

Titre: Modèle de génération de mouvements rapides en représentation de
Title: signatures manuscrites

Auteur: Franck Leclerc
Author:

Date: 1996

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Leclerc, F. (1996). Modèle de génération de mouvements rapides en
Citation: représentation de signatures manuscrites [Ph.D. thesis, École Polytechnique de
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/8963/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/8963/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:**
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

Modèle de génération de mouvements rapides
en représentation de signatures manuscrites

FRANCK LECLERC

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET DE GÉNIE INFORMATIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIÆ DOCTOR (Ph.D.)
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)

Juillet 1996



National Library
of Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

Acquisitions et
services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-26425-4

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

Modèle de génération de mouvements rapides
en représentation de signatures manuscrites

présentée par: LECLERC Franck

en vue de l'obtention du diplôme de: Philosophiæ Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

M. Brault Jean-Jules, Ph.D., président

M. Plamondon Réjean, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. Sabourin Robert, Ph.D., membre

M. Gingras Denis, Ph.D., membre

À Lancelot, ma blonde, ma famille et mes ami(e)s.

Résumé

L'informatique envahit de plus en plus notre quotidien. Avec l'explosion du réseau "*internet*", les micro-ordinateurs vont pénétrer tous les foyers prochainement. Résultat: beaucoup de transactions vont se faire électroniquement et un contrôle va devoir être effectué pour s'assurer de l'identité de l'utilisateur ou du demandeur de service. Mais la vérification de l'identité ne se limite pas à ce domaine, c'est une réalité de notre société. Une façon d'aborder le problème du contrôle d'identité consiste à utiliser la signature manuscrite de l'individu. Cette vérification peut être automatisée afin de réaliser un contrôle plus exhaustif des transactions (par exemple bancaires), ce qui n'est pas le cas actuellement.

Beaucoup de chercheurs se sont intéressés à la vérification automatique des signatures à cause des retombées économiques qui peuvent en découler. Ce domaine a pris de l'ampleur dans les années 70 grâce notamment à l'avènement des tablettes à digitaliser, matériels de série relativement bon marché dont la qualité ne cesse d'augmenter.

Même si actuellement certains travaux ont donné des résultats satisfaisants, il demeure un problème non résolu, celui de *la représentation des signatures*. Sa résolution permettrait de favoriser la réalisation de systèmes de vérification automatique de signatures beaucoup plus robuste.

Cette thèse propose une représentation universelle des signatures manuscrites respectant quatre critères essentiels:

- *permettre de reproduire la statique: l'image de la signature;*

- *permettre de reproduire la dynamique (cinématique);*
- *permettre de paramétrer la signature;*
- *accepter différentes transformations: translation, rotation, homothétie temporelle et spatiale.*

Pour parvenir à cet objectif, nous avons dû entre autres:

- adapter un modèle de génération de mouvements rapides aux tracés complexes que sont les signatures;
- résoudre le problème de l'extraction des paramètres à partir du modèle.

Pour ce dernier point, la régression non linéaire a été utilisée. Celle-ci intervient à deux niveaux:

- pour étudier l'image de la signature afin d'extraire des cibles virtuelles;
- pour les profils de vitesse afin d'extraire la cinématique du mouvement.

La représentation des signatures ainsi obtenue a été validée sur une banque de 220 signatures – provenant de 22 individus – permettant de couvrir les grands types de signature: arabes, européennes, américaines et chinoises. La validation a été réalisée grâce à un système de vérification de signatures breveté. Les résultats confirment la validité de la représentation proposée.

La mise en œuvre de la représentation permet de proposer des hypothèses quant à la génération de mouvements complexes et appris dans le cadre particulier de l'action de signer. Elle a également conduit à une approche pour résoudre l'extraction des paramètres à partir du modèle, grâce à l'utilisation de cibles virtuelles comme point d'appui de la construction du tracé.

La représentation proposée devrait favoriser la réalisation de systèmes de vérification de signatures grâce à son aspect paramétrique. De plus, l'approche paramétrique permet de faire une compression de données, ce qui n'est pas négligeable dans

le contexte d'une application bancaire, nécessitant le stockage de plusieurs milliers de signatures.

Enfin, la représentation permet d'ouvrir des pistes pour l'étude et la compréhension des mouvements complexes.

Abstract

Computer-based transactions have invaded our daily lives. The explosive growth of the computer network Internet will cause the personal computer to soon become a part of every household. Consequently, many transactions will be carried out electronically. For this reason, controls will be needed to verify the identification of the user of services. The identification of a person is not limited to the area of computers, but is a real problem for society. One approach to this problem is to verify the authenticity of a person's written signature. Although presently not currently in practice, verification could be automated to exhaustively control transactions (for example as in banking).

Many researchers have become interested in this problem because of the potential economic rewards. This problem started to become a topic of major interest in the 1970's with the introduction and development of digitizers, a relatively inexpensive piece of equipment.

Presently, even though research projects have provided a few satisfactory results, the representation of signature is still an unresolved problem. The solution to this problem is essential if one is interested in an universal method for automatically verifying a signature.

This thesis propose an universal representation with four essential criteria:

- ability to reproduce the static nature of the signature: the image of the signature;

- ability to represent the dynamic aspects of the signature;
- provide description of the signature with parameters;
- accept different transformations: translation, rotation, and homomorphy in relation to time and space.

To meet this objective, we have:

- transposed a model of rapid human to generate complex lines that compose a signature;
- solved the problem of extraction of the parameters according to the model.

For the extraction of parameters, a non-linear regression was used at two level:

- to analyze the image of the signature for extraction of virtual targets;
- to analyze the dynamic aspect of the signature.

Following the proposed signature's representation, this thesis demonstrates the validation of 220 signatures encompassing many types: arabic, european, american and chinese. The validation was done with an automatic verification system. The results confirmed the validity of the proposed representation.

The representation of signatures allow to propose a hypothesis regarding the creation of learned complex movements within the framework of the signing motion. The thesis also give an approach to solve the extraction problem of parameter from the model with the utilization of visual targets like the starting point for the construction of the signature.

This proposed representation should favor the creation of a signature verification system due to its parametric nature. Moreover, the parametric approach allows the compression of data, that would be beneficial in the context of bank transactions, which require the storage million of signatures. Finally the representation model allows the opening of possibilities for understanding complex movements.

Remerciements

Je remercie mon directeur Réjean Plamondon de m'avoir permis de venir étudier à l'École Polytechnique de Montréal, pour son encadrement, ses conseils et l'aide financières qu'il m'a accordée à la fin de ma scolarité.

Je remercie Wacef Gerfali, Gildas Ménier, Christian Langheit et Pierre Yergeau pour la lecture de cette thèse, leurs conseils et leurs encouragements durant les moments difficiles.

Je remercie André Desrochers pour son soutien moral, son amitié et pour ses multiples connaissances qui m'ont été maintes fois très utiles.

Je remercie les personnes qui ont bien voulu me donner leur signature pour les besoins de cette thèse.

Je remercie Denise Desbiens et Murielle Joinville pour les corrections orthographiques et Marie Beauregard pour la traduction en anglais du résumé.

Je remercie Denise et Jacques Desbiens pour avoir pris soin de mon fils Lancelot pour me permettre de me consacrer à ma thèse.

Je remercie Hélène Dallaire pour la dactylographie de certaines parties de cette thèse.

Je remercie mes parents Jocelyne et Lucien Leclerc de m'avoir permis de venir étudier au Québec et pour tout ce qu'ils ont fait pour moi. Pour cela je leur serai éternellement reconnaissant.

Enfin, je remercie Nathalie Desbiens pour sa patience et pour m'avoir enduré durant toute ma thèse (surtout sur la fin).

Table des matières

Dédicace	ii
Résumé	iii
Abstract	vi
Remerciements	viii
Table des matières	ix
Liste des tableaux	xiii
Liste des figures	xv
Liste des annexes	xix
Avant-Propos	xx
1 INTRODUCTION	1
1.1 Les systèmes de vérification de l'identité	1
1.2 Les systèmes de vérification de signatures	4
1.3 Représentation des signatures	7
1.4 Objectifs de recherche	10
1.5 Plan de thèse	11

2	PRÉSENTATION DU MODÈLE	14
2.1	Justification du choix	15
2.2	Historique du modèle	16
2.2.1	Modèle exponentiel	18
2.2.2	Modèle gaussien	20
2.2.3	Modèle lognormal	22
2.2.4	Modèle lognormal borné	25
2.2.5	Modèle delta lognormal	27
2.2.6	Modèle delta lognormal vectoriel	33
2.3	Conclusion	36
3	ÉTUDE DES COURBES DELTA LOGNORMALES	39
3.1	Courbes lognormales	40
3.1.1	Lognormale à deux paramètres	40
3.1.2	Lognormale à trois paramètres	45
3.1.3	Lognormale à quatre paramètres	46
3.2	Courbes delta lognormales	47
3.2.1	Études avec les μ et σ égaux	47
3.2.2	Simplification avec σ égaux et μ différents	48
3.2.3	Aucune simplification	66
3.3	Conclusion	71
4	REPRÉSENTATION DES SIGNATURES	74
4.1	Synthèse de tracés manuscrits	74
4.1.1	Trait courbe	75
4.1.2	Trait droit	78
4.1.3	Génération d'un tracé complexe	81
4.2	Extraction de la statique	84
4.2.1	Avant-propos	84

4.2.2	Méthodologie	86
4.2.3	Exemples d'extraction de la statique	89
4.3	Extraction de la cinématique	91
4.3.1	Mise en garde	91
4.3.2	Principes de bases pour la génération de signatures	93
4.3.3	Réalisation pratique	100
4.3.4	Influence du choix des conditions initiales	109
4.3.5	Ajustement de la représentation des signatures	109
4.4	Énoncé de la représentation	115
4.5	Avantages de la représentation des signatures	120
4.5.1	Gestion de la taille d'une signature	120
4.5.2	Gestion de la durée d'une signature	123
4.5.3	Gestion de position et de l'orientation d'une signature	123
4.6	Variation de la précision	126
4.6.1	Première possibilité	127
4.6.2	Deuxième possibilité	129
4.7	Précision constante	133
4.8	Conclusion	135
5	VALIDATION DE LA REPRÉSENTATION DES SIGNATURES	137
5.1	Description de la banque de signatures	138
5.2	Description des traitements	141
5.3	Extraction des paramètres	146
5.4	Protocole de la validation de la représentation	148
5.4.1	Le système VDS	149
5.4.2	Abonnement au système VDS	152
5.4.3	Résultats avec le système VDS	153
5.5	Résultats de la validation de la représentation	154
5.5.1	Validation sur les composantes	154

5.5.2	Validation sur les signatures complètes	160
5.5.3	Validation avec les faux aléatoires	163
5.6	Analyse des problèmes	165
5.7	Compression de données	170
5.8	Conclusion	172
6	CONCLUSIONS	174
6.1	Apports et Contributions originales	175
6.2	Perspectives	178
	RÉFÉRENCES	182

Liste des tableaux

1.1	Signaux utilisés en vérification dynamique de signatures	5
3.1	Paramètres des delta lognormales de la figure 3.4	49
3.2	Paramètres des delta lognormales de la figure 3.8	55
3.3	Paramètres des delta lognormales de la figure 3.9	57
3.4	Paramètres des delta lognormales de la figure 3.10	60
3.5	Paramètres des delta lognormales de la figure 3.11	62
3.6	Paramètres des delta lognormales de la figure 3.12	64
3.7	Paramètres des delta lognormales des figures 3.13 et 3.14	68
4.1	Paramètres du tracé complexe de la figure 4.5	82
4.2	Paramètres de la figure 4.13	101
4.3	Paramètres de la figure 4.14	103
4.4	Paramètres de la figure 4.15	105
4.5	Paramètres de la figure 4.16	108
4.6	Paramètres de la signature de la figure 4.21	116
4.7	Paramètres de la signature de taille normale	122
4.8	Paramètres de la signature de taille $\times 2$	122
4.9	Paramètres d'une signature 2 fois plus rapide	124
4.10	Paramètres de la signature de référence	127
5.1	Répartition des types de signatures	140

5.2	Pourcentage des composantes dans les signatures	145
5.3	<i>EQM</i> moyennes sur l'image et les profils v_σ et v_θ des 22 signataires .	147
5.4	Pondérations utilisées pour produire les résultats	152
5.5	Résultats pour les composantes avec un seul abonnement	155
5.6	Résultats pour les composantes avec deux abonnements	155
5.7	Taux d'acceptation pour les composantes	155
5.8	Résultats pour les composantes avec 1 abonnement (<i>bis</i>)	158
5.9	Résultats pour les composantes avec 2 abonnements (<i>bis</i>)	158
5.10	Taux d'acceptation pour les composantes (<i>bis</i>)	158
5.11	Résultats pour les signatures complètes avec 1 abonnement	160
5.12	Résultats pour les signatures complètes avec 2 abonnements	160
5.13	Taux d'acceptation pour les signatures complètes	161
5.14	Résultats pour les signatures complètes avec 1 abonnement (<i>bis</i>) . . .	162
5.15	Résultats pour les signatures complètes avec 2 abonnements (<i>bis</i>) . .	162
5.16	Taux d'acceptation pour les signatures complètes (<i>bis</i>)	162
5.17	Résumé des résultats avec les faux aléatoires	164
5.18	Pourcentage de même réponse avec les faux aléatoires	164
B.1	Somme des indices	200
E.1	<i>EQM</i> de la tablette WACOM pour la banque de signatures	208
E.2	<i>EQM</i> de la tablette PENCEPT pour la banque de signatures	209
E.3	<i>EQM</i> de la tablette WACOM pour la vitesse curviligne	210
E.4	<i>EQM</i> de la tablette PENCEPT pour la vitesse curviligne	211
E.5	<i>EQM</i> de la tablette WACOM pour la vitesse angulaire	212
E.6	<i>EQM</i> de la tablette PENCEPT pour la vitesse angulaire	213
H.1	Résultats sur des faux aléatoires avec la tablette Wacom	229
H.2	Résultats sur des faux aléatoires avec la tablette Pencept	229

Liste des figures

1.1	Schématisation du choix de la biométrie	7
2.1	Schéma bloc de la modélisation	17
2.2	Réponse d'un système neuromusculaire (agoniste ou antagoniste) . . .	28
2.3	Profil de vitesse à 1 pic	29
2.4	Profil de vitesse à deux pics	30
2.5	Schéma bloc du modèle delta lognormal vectoriel	34
2.6	Sommation de deux traits curvilignes.	36
3.1	Effet du paramètre d'échelle temporelle, $\mu = 0$	42
3.2	Effet du paramètre d'échelle temporelle, $\mu = -\ln(2)$	42
3.3	Effet du paramètre de forme σ avec $\mu = 0$	43
3.4	Courbes delta lognormales avec les μ et σ égaux	49
3.5	Évolution de k en fonction de D_1/D_2 et de σ	51
3.6	Évolution de la différence des paramètres μ_1 et μ_2	53
3.7	Cas du passage par zéro au début du mouvement.	54
3.8	Courbes delta lognormales avec MT constant: première possibilité . .	55
3.9	Courbes delta lognormales avec MT constant: deuxième possibilité .	57
3.10	Courbes delta lognormales avec MT constant: troisième possibilité .	60
3.11	Courbes delta lognormales avec MT constant: quatrième possibilité .	62
3.12	Courbes delta lognormales avec MT constant: cinquième possibilité .	64
3.13	Passage par zéro au début du mouvement.	67

3.14	Passage par zéro à la fin du mouvement.	67
3.15	Un passage par zéro dans le cas des μ égaux et σ différents.	72
3.16	Deux passages par zéro dans le cas des μ égaux et σ différents.	72
4.1	Position de la pointe de la plume pour un trait courbe	76
4.2	Trait courbe	79
4.3	Position de la pointe de la plume pour un trait droit	80
4.4	Trait droit	81
4.5	Un tracé complexe.	82
4.6	Profil de vitesse curviligne d'un tracé manuscrit complexe	87
4.7	Détermination de la position de la cible virtuelle	88
4.8	Statique d'une signature avec position des cibles virtuelles	89
4.9	Cibles virtuelles du signataire 11.	90
4.10	Cibles virtuelles du signataire 16.	90
4.11	Dépendance de t_0 avec μ selon l'équation 4.19	96
4.12	Activité d'une paires d'antagonistes	97
4.13	Reconstruction avec une sommation linéaire.	101
4.14	Reconstruction avec une sommation vectorielle: solution 1.	103
4.15	Reconstruction avec une sommation vectorielle: solution 2	105
4.16	Reconstruction avec une sommation vectorielle: solution 3	108
4.17	Comparaison de la vitesse curviligne entre l'originale et le synthétique	109
4.18	EQM en fonction de μ et σ	110
4.19	Détermination des conditions initiales de la régression	112
4.20	EQM en fonction de t_l et σ	114
4.21	Signature synthétique.	116
4.22	Profil de la vitesse curviligne de la signature de la figure 4.21	117
4.23	Profil de la vitesse angulaire de la signature de la figure 4.21	117
4.24	Processus plausible de génération des signatures	118
4.25	Changement de la taille d'une signature($\times 2$)	121

4.26	Changement de la durée d'une signature	124
4.27	Rotation de 180 degré d'une signature	125
4.28	Variation de la précision	128
4.29	Variation de la précision avec compensation par μ pour conserver les mêmes MT	130
4.30	Variation de la précision avec compensation par σ pour conserver les mêmes MT	132
4.31	Variation de σ à précision spatiale relative constante avec un compen- sation par μ_1	134
5.1	Différents types de signatures	139
5.2	Diagramme de flux de données des traitements pour une signature . .	142
5.3	Signature synthétique acceptée avec les références	159
5.4	Signature originale refusée avec la signature synthétique acceptée . .	159
5.5	Illustration d'une cause de rejet en statique	166
5.6	Problème de surestimation de la distance	167
5.7	Première heuristique	168
5.8	Deuxième heuristique	169
C.1	Calcul de la vitesse le long d'un trait	203
D.1	Signature originale du signataire 11	206
D.2	Signature originale du signataire 16	206
F.1	signataire de type nord-américain: image de la signature	215
F.2	signataire de type arabe: image de la signature	215
F.3	signataire de type chinois: image de la signature	216
F.4	signataire de type européen: image de la signature	216
F.5	signataire de type nord-américain: vitesse curviligne	217
F.6	signataire de type arabe: vitesse curviligne	217

F.7	signataire de type chinois: vitesse curviligne	218
F.8	signataire de type européen: vitesse curviligne	218
F.9	signataire de type nord-américain: vitesse angulaire	219
F.10	signataire de type arabe: vitesse angulaire	219
F.11	signataire de type chinois: vitesse angulaire	220
F.12	signataire de type européen: vitesse angulaire	220
G.1	Originaux et synthétiques des signataires 1 à 4	222
G.2	Originaux et synthétiques des signataires 5 à 8	223
G.3	Originaux et synthétiques des signataires 9 à 12	224
G.4	Originaux et synthétiques des signataires 13 à 16	225
G.5	Originaux et synthétiques des signataires 17 à 20	226
G.6	Originaux et synthétiques des signataires 21 à 22	227

Liste des annexes

A	LOGNORMALE BORNÉE	195
B	CALCUL VECTORIEL DES VITESSES	197
B.1	Mouvement simple	197
B.2	Mouvement composé	199
C	CALCUL DE LA VITESSE LE LONG D'UN TRAIT	202
D	SIGNATURES	205
E	ERREURS QUADRATIQUES MOYENNES	207
E.1	Image de la signature	207
E.2	Vitesse curviligne	207
E.3	Vitesse angulaire	207
F	COMPARAISON DE SIGNATURES	214
G	SIGNATURES ORIGINALES ET SYNTHÉTIQUES	221
H	RÉSULTATS SUR LES FAUX ALÉATOIRES	228

Avant-Propos

Cette thèse a été réalisée dans le cadre des travaux de recherche du laboratoire Scribens¹, dirigée par le professeur Réjean Plamondon. Les chercheurs du laboratoire Scribens s'intéressent tout spécialement aux domaines suivants:

- reconnaissance d'écriture;
- vérification de signatures;
- modélisation:
 - des mouvements rapides,
 - des tracés manuscrits;

Dans certains de ces domaines d'intérêt, des chercheurs du laboratoire ont apporté leur contribution par l'introduction de techniques comme *les réseaux de neurones* [33, 93] et *les algorithmes génétiques*.

Dans des perspectives à court, moyen et long terme, le laboratoire Scribens s'est engagé dans la réalisation de systèmes de reconnaissance d'écriture manuscrite [58] et de vérification de signatures [11, 67, 69, 90, 76], en intégrant progressivement la théorie cinématique des mouvements rapides développée par R. Plamondon [72, 73, 77, 78] avec le modèle delta lognormal.

¹Laboratoire du département de génie électrique et de génie informatique de l'École Polytechnique de Montréal

Par l'introduction du modèle delta lognormal vectoriel pour la représentation des signatures manuscrites, cette thèse constitue une étape importante vers la réalisation d'un système de vérification de signatures basé exclusivement sur ce modèle.

Chapitre 1

INTRODUCTION

1.1 Les systèmes de vérification de l'identité

Il y a plusieurs façons de vérifier l'identité d'une personne pour protéger l'accès à un lieu, à des informations, à des biens, etc. Ces différentes méthodes de vérification ou de protection sont regroupées dans quatre classes par R. Joyce et G. Gupta [30], selon qu'elles se basent sur:

1. la possession: l'individu voulant s'identifier ou avoir un accès privilégié *possède* une clef, une pièce d'identité, une carte magnétique, un passeport;
2. la connaissance: l'individu doit *connaître* un mot de passe pour s'identifier ou une combinaison pour accéder à un lieu, à des informations ou à des biens;
3. l'action: pour s'identifier la personne doit exécuter une action, comme par exemple: produire une signature ou taper au clavier (pour ce dernier cas voir [30]);
4. la biométrie: dans ce cas ce sont les caractéristiques biophysiques d'un individu qui servent d'identificateur, celles-ci étant considérées comme unique. Dans cette classe, on trouve entre autres les empreintes digitales [28], la vascularisa-

tion de la rétine [94], la voix [29] et la forme du visage [50, 96] comme moyen d'identification.

Si l'on veut paraphraser R. Joyce et G. Gupta, les trois premières classes peuvent s'exprimer par les verbes: *posséder*, *connaître*, *agir*, qui nécessitent une participation plus ou moins active de la personne alors que la dernière, pourrait s'exprimer par le verbe "*être*" qui dénote une participation passive de l'individu puisque l'identification se fait à ses dépens à partir de caractéristiques biométriques que l'on considère uniques, sur lesquelles il n'a aucun contrôle.

La possession et la connaissance font partie des méthodes d'identification les plus utilisées actuellement. Elles sont faciles à implanter, bien tolérées et de coût réduit. Malheureusement, ces méthodes d'identification ne sont pas des plus sûres car elles ne peuvent pas garantir l'identité de la personne. Ceci tient du fait que ce que l'on possède pour s'identifier peut être perdu ou volé et que ce que l'on connaît peut être plagié ou appris par quelqu'un d'autre.

L'action est plus difficile à reproduire (ou imiter) mais n'est certainement pas infailible. Par exemple, dans le cas des signatures, les faussaires sont en quelque sorte des spécialistes de l'imitation de l'action. Cependant, il faut émettre une réserve concernant l'imitation de l'action pour les signatures. S'il est possible d'imiter le résultat de l'action, par exemple la forme de la signature sur une feuille de papier, il est très difficile voir quasi impossible d'imiter parfaitement le geste produit par un bio-système que l'on peut qualifier d'unique. Effectivement, si l'on considère le processus de génération d'une signature sous l'aspect d'un système (le système: cerveau-bras-main qui l'a généré) et qu'on observe certaines caractéristiques au cours du temps – par exemple la vitesse, l'accélération etc. –, on peut s'attendre à ce que celles-ci soient pratiquement inimitables; ce qui fait que l'on peut classer l'action de signer dans la 4^{ième} classe de R. Joyce et G. Gupta. C'est ainsi que Jérôme Rosen regroupe la vérification des signatures, des empreintes digitales, des vaisseaux de la rétine et de la voix dans "*les systèmes biométriques*" [94]. Ces systèmes permettent de mesurer

des caractéristiques propres à chaque individu. En ce sens, la génération d'une action fait partie de la 4^{ième} classe de R. Joyce et G. Gupta puisque le biosystème qui la produit est unique.

Cependant, même si les systèmes biométriques sont relativement sûrs, ils possèdent leurs propres inconvénients qui font que ces systèmes, même s'ils sont utilisés actuellement (voir article de J. Rosen [94]), ne sont pas couramment répandus. Ainsi par exemple, les systèmes biométriques de vérification de l'identité à partir des empreintes digitales sont mal acceptés socialement à cause de leur connotation criminelle, ce qui les empêcherait d'être utilisés de façon généralisée, même si ces systèmes étaient extrêmement performants.

Le caractère novateur peut aussi être un handicap à l'implantation d'un système. Les habitudes des gens sont difficiles à changer, ce qui fait qu'un système vérifiant les vaisseaux de la rétine pourrait avoir du mal à s'imposer car le grand public n'est pas habitué à regarder dans des oculaires pour se faire identifier. De plus, un bon système de vérification automatique de l'identité ne doit pas être trop contraignant pour qu'il soit accepté. Ainsi, mettre la tête dans une machine et fixer du regard un point lumineux pour se faire identifier représente une contrainte qui peut ne pas être acceptée par la grande majorité. Donc, on peut retenir au moins 3 critères importants pour la généralisation de l'utilisation d'un système d'identification qui sont: l'acceptation, le caractère novateur et la contrainte.

L'utilisation de la voix comme moyen d'identification respecte ces différents critères. Elle n'est pas contraignante (parler ne constitue pas une contrainte), elle serait facilement acceptée par la majorité et le caractère novateur n'est pas visible par la personne qui veut se faire identifier. Malheureusement, la réalisation d'un tel système est très complexe (c'est un domaine de recherche très actif), coûte encore très cher et, est limitée dans ses possibilités d'utilisation par le fait que la voix peut facilement changer à cause d'un rhume, du stress ou autres. Cette grande variabilité de la voix ne permet donc pas une large application de ce procédé. De plus la voix peut être en-

registrée très facilement (ou imitée) ce qui réduit passablement ses possibilités d'être utilisée de façon généralisée.

Enfin, un système de vérification de l'identité par la signature serait bien accepté si son utilisation était généralisée car un individu est régulièrement sollicité pour produire sa signature (factures, chèque, formulaire, etc.). De plus, le caractère novateur n'est pas visible par le grand public – le matériel utilisé est basé sur un crayon presque ordinaire – et un tel système ne serait pas contraignant puisqu'il ne changerait pas nos habitudes. Par contre, si l'on veut que ce système soit très sûr, il faut qu'il appartienne à la classe 4 (analyse biométrique), présentée précédemment, et non à la classe 3 (analyse du résultat de l'action) où l'imitation est toujours possible.

Maintenant que nous avons situé la problématique de la vérification de l'identité, nous allons nous attacher plus spécifiquement à celle de la vérification de signatures, cadre dans lequel s'inscrit le sujet de cette thèse.

1.2 Les systèmes de vérification de signatures

Comme nous venons de le voir, si on envisage la conception d'un système de vérification de l'identité, la signature semble un choix très intéressant. Cependant, la réalisation d'un tel système est loin d'être évidente et de nombreux chercheurs travaillent dans ce domaine [41, 83, 84]. Cette grande activité en recherche s'explique en partie par les pertes financières importantes engendrées par la fraude. Pour fixer les idées, on estime que juste pour la fraude des cartes bancaires, les pertes s'élèvent à 1 milliard de dollars annuellement dans le monde¹. Ainsi, le contrôle systématique de la signature par du matériel approprié pourrait être bénéfique pour une diminution des fraudes.

À l'intérieur du domaine de la vérification de signatures, il faut toutefois distinguer 2 approches [5, 60, 61, 83, 84]:

¹journal télévisé de radio Canada du 19 octobre 1993

Tableau 1.1: Signaux utilisés en vérification dynamique de signatures

Matériel	Signaux utilisés	Références
Spécifique	Position	[20, 47, 5, 15]
	vitesse	[6, 15]
	accélération	[27, 44, 108, 80]
	force	[14, 25, 104, 109]
	pression	[27, 48, 97]
	variation de pression	[108]
Commercial	position	[10, 16, 26, 34, 17, 51, 90, 97, 104, 105]
	vitesse	[90]
	pression	[44, 51]

- la vérification statique de signatures [41, 85];
- la vérification dynamique de signatures [5, 6, 41, 45, 59, 95].

En vérification statique, on s'intéresse à l'image de la signature où, toute information temporelle directe a disparu². L'image est obtenue avec une caméra ou un scanner à partir d'une signature déjà apposée sur un document. Dans ce cas, on se situe donc dans des systèmes de classe 3. Cette thèse s'intéressant à un système de classe 4, nous n'élaborerons pas plus sur le sujet.

En vérification dynamique, l'information temporelle est conservée. Il peut s'agir de la vitesse de la pointe du crayon observée au cours du temps, de son accélération ou toute autre fonction temporelle représentative du mouvement exécuté. Ces signaux sont obtenus soit à partir d'une tablette à digitaliser ou d'un crayon spécial muni de capteurs miniatures. Le tableau 1.1 fait un résumé sommaire des différents signaux déjà étudiés. En général ces travaux vise plutôt à développer des systèmes de classe 4.

Pourtant, peut-on être sûr, qu'en observant un signal de vitesse ou d'accélération, on fait de la biométrie? Est-ce que les mesures que l'on prend sont spécifiques à

²on pourrait à la limite retrouver partiellement l'ordre d'exécution des différents traits de la signature [9, 43, 93]

l'individu? En conséquence, la première question à se poser avant de concevoir un système de vérification dynamique de signatures de classe 4 est:

Les signaux, mesures ou paramètres choisis permettent-ils de dire que ce système appartient à la classe 4?

Les bons résultats obtenus par certaines équipes de recherche en vérification dynamique de signatures semblent indirectement montrer que les signaux choisis font du sens du point de vue biométrique puisque l'on fait la distinction entre une signature originale et une imitation parfois avec des taux d'erreur relativement faibles [41, 83].

Dans le cadre particulier de la vérification dynamique de signatures, puisque le succès d'un système semble dépendre de son intégration plus ou moins directe à la classe 4, deux approches sont possibles:

- soit de s'assurer que le signal observé et choisi peut être considéré comme une caractéristique biométrique;
- soit de modéliser le biosystème de génération de signatures manuscrites et de baser la biométrie sur les paramètres de ce modèle.

La figure 1.1 schématise ces deux approches pour résoudre le problème de la vérification dynamique de signatures. On peut partir de l'espace des mesures en faisant l'hypothèse que le signal choisi reflète le biosystème de l'individu ou partir de l'individu et d'un modèle de son biosystème pour décider de la biométrie à choisir.

Pour l'instant, tous les chercheurs dans le domaine de la vérification de signatures se sont attaqués au problème en partant de l'espace des mesures afin de caractériser le biosystème. L'autre approche, basée sur l'espace *individu* reste à explorer. Elle pourrait par exemple consister, à partir de la connaissance du biosystème basée sur un modèle, à analyser ce qui fait son caractère unique pour décider des mesures (la biométrie). Le choix de la biométrie devrait ensuite permettre la réalisation d'un système de vérification de signatures de classe 4.

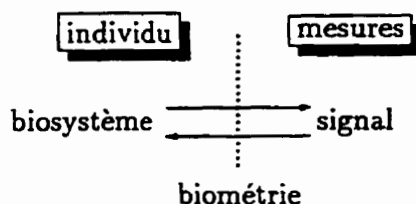


Figure 1.1: Schématisation du choix de la biométrie

Par conséquent, si on veut explorer cette nouvelle démarche, il est essentiel dans un premier temps de connaître le biosystème de génération de signatures manuscrites, ce qui ramène progressivement la vérification de signatures à un problème de modélisation et de représentation des signatures. De plus, si la représentation des signatures est caractéristique du biosystème alors, on peut garantir que le système de vérification appartiendra à la classe 4, ce qui permet de répondre à la question posée précédemment.

1.3 Représentation des signatures

À priori, il semble que toute la problématique de la vérification de signatures réside dans l'espace de représentation de celle-ci. Ainsi, si l'on veut concevoir un bon système de vérification de signatures de classe 4, il faut une bonne représentation de ces dernières.

Actuellement, deux grands types de représentation des signatures peuvent être distingués et être utilisés séparément ou conjointement:

- la représentation paramétrique;
- la représentation par fonction.

Dans la représentation paramétrique, la signature est caractérisée par un ensemble de mesures (paramètres), regroupées sous la forme d'un vecteur. Dans ce cas, on

obtient un “résumé” de la signature, car à partir de ces mesures, il s’avère impossible de retrouver la signature originale. Cette représentation est donc “incomplète”. Par contre, cette représentation offre l’avantage d’une comparaison facile et rapide entre deux signatures. Ainsi, il suffit dans ce cas, de calculer une distance (*ex.*: Euclidienne) entre les signatures originale et test pour ensuite, en fonction d’un seuil, accepter ou rejeter la signature test.

Dans ce type de représentation, les faux aléatoires ont des chances d’être acceptés, car en fonction du nombre de paramètres utilisés, une autre signature d’un autre individu, peut donner des mesures proches d’une signature très différente. La représentation de la signature par l’approche paramètre pose donc un problème. Le fait entre autres que cette représentation soit *incomplète* et ne permette pas de retrouver la signature originale, constitue une faille lorsque ce type de représentation est utilisée dans un système de vérification de signatures.

Dans la représentation par fonction, la signature se présente sous la forme d’une caractéristique enregistrée au cours du temps (vitesse, accélération, coordonnées de la signature,...). La difficulté réside cette fois-ci, dans la comparaison des fonctions. Les méthodes employées sont: la corrélation, la corrélation régionale et la programmation dynamique. Ces différentes méthodes sont relativement coûteuses en temps de calcul, ceci à cause du nombre de points utilisés pour la représentation de la signature. De plus, il faut permettre certaines déformations à cause de la variabilité qu’il existe entre différentes signatures d’un même individu. Donc, la méthode utilisée pour la comparaison doit être souple à ce niveau.

Cette représentation des signatures peut être “complète” en ce sens, que l’on peut retrouver la signature originale si l’on sauvegarde plusieurs signaux (minimum 2). Par exemple, si l’on conserve $x(t)$ et $y(t)$, on dispose de toute l’information pour reconstruire l’image de la signature et sa dynamique. Malheureusement, cette représentation dépend de la position de la signature et de son orientation ce qui oblige à faire des transformations avant d’aborder la comparaison des signatures. Une autre

représentation, celle-ci invariante aux translations et aux rotations, consiste à utiliser les signaux de vitesse. Ainsi, si l'on utilise la vitesse curviligne (norme du vecteur vitesse de la pointe du crayon), on peut avoir une représentation *complète* de la signature si on l'associe à l'information de vitesse angulaire. Avec cette représentation, cela implique une comparaison des deux signaux de vitesse avec des méthodes de comparaison semblables à celles qui ont été mentionnées précédemment. Dans ce cas, ces deux comparaisons vont doubler les temps de traitement, ce qui peut être préjudiciable pour la réalisation d'un système automatique de vérification de signatures. De plus, le signal de vitesse angulaire est très bruité, ce qui affecte les méthodes de comparaison de fonctions qui réagissent mal à ce type de signaux.

Dans une telle situation, la solution peut consister à ne vérifier alors que la vitesse curviligne, ce qui laisse une faille pour la fraude puisque l'on ne dispose pas de l'information complète de la signature.

Donc, l'étape du choix de la représentation des signatures est très importante dans la problématique de conception d'un système de vérification de signatures. Le succès d'un tel système, réside, selon notre conviction, dans le soin apporté à son choix. Ainsi, une bonne représentation devrait contenir suffisamment d'informations pour permettre de reproduire l'original. De plus, elle devrait si possible, permettre une approche paramétrique afin de simplifier l'étape de comparaison. La paramétrisation permet en outre de comprimer l'information concernant la signature, ce qui est important pour une application à grande échelle (bancaire par exemple), où l'on doit stocker un nombre important de signatures.

Par conséquent, une bonne représentation des signatures devrait:

- *être capable de reproduire la statique: l'image de la signature;*
- *être capable de reproduire la dynamique (cinématique);*
- *paramétriser la signature;*

- *accepter les différentes transformations suivantes: translation, rotation, homothétie temporelle et spatiale.*

Une telle représentation est indispensable avant d'entreprendre la conception d'un système de vérification de signatures. Malheureusement, il n'existe pas actuellement de représentation qui respectent tous ces critères. Pourtant, il semble que ce soit une des issues pour faire progresser la conception des systèmes de vérification dynamique de signatures.

1.4 Objectifs de recherche

Le système *cerveau-bras-main* est très complexe, et une façon d'apprendre à le connaître ou de le comprendre consiste à le modéliser. Ensuite, si ce modèle reflète bien le biosystème en question, on dispose alors d'un moyen pour choisir des mesures biométrique qui le caractérise afin de réaliser des systèmes de vérification de signatures de classe 4. De plus, l'idée sous-jacente étant d'avoir une représentation des signatures, une modélisation du processus de génération semble un bon moyen d'y parvenir.

Par conséquent, si on décide d'utiliser un modèle pour construire un système biométrique de vérification de signatures de classe 4, deux alternatives sont envisageables. Soit, développer un modèle pour la génération de signatures soit, utiliser un modèle existant, qui n'a pas été spécifiquement développé pour la signature, et l'adapter au cadre spécifique de ce domaine.

Au laboratoire Scribens, nous avons déjà tenté de modéliser la génération de signature manuscrites [38]. Mais ce modèle n'était pas entièrement satisfaisant et il a été abandonné. De plus, il n'existe à notre connaissance aucun modèle spécifique du biosystème de génération de signatures manuscrites.

Toutefois, si le but est de réaliser un système biométrique avec une représentation des signatures basées sur un modèle déjà existant, il faut nécessairement aborder les

étapes suivantes:

1. choisir un modèle;
2. comprendre et étudier le modèle;
3. adapter le modèle;
4. obtenir une représentation des signatures à partir de celui-ci;
5. analyser le pouvoir discriminant de la représentation des signatures;
6. réaliser et tester le système complet intégrant le modèle.

Dans le cadre plus vaste d'un projet visant à inclure un modèle cinématique dans un système de vérification de signatures déjà existant [67, 69], l'objectif principal de cette thèse est de donner une représentation des signatures — respectant les critères énoncés précédemment — basée sur un modèle de génération de mouvements rapides. Cette thèse propose donc d'aborder la problématique de la représentation des signatures dans le but de réaliser un système de vérification de signatures. La conception d'un système au complet étant un objectif à plus long terme qui dépasse le cadre de cette thèse, celle-ci va se limiter aux 4 premières étapes décrites précédemment.

La section suivante présente le plan de cette thèse.

1.5 Plan de thèse

L'objectif principal de cette thèse étant de parvenir à l'étape 4, le chapitre 2 va correspondre grossièrement à l'étape 1 de la section précédente: *choisir le modèle*. Dans ce chapitre, nous allons à la fois, justifier notre choix et faire un historique sur le développement du modèle choisi. Cet historique du modèle va permettre d'expliquer comment on est arrivé à ce modèle et, de présenter au lecteur les points importants qui vont être utilisés pour parvenir à notre objectif. L'emphasis dans ce chapitre étant

principalement mise sur l'évolution du modèle de génération de mouvements rapides et sur sa présentation, le titre *Présentation du modèle* a été retenu plutôt que *Choix du modèle* correspondant à l'étape 1.

Le chapitre 3 quant à lui, vise à donner une compréhension plus fine du modèle dans le cas de mouvements simples et rapides, étude indispensable pour aborder la suite et justifier les choix qui ont été faits. Dans ce chapitre, on tentera de faire ressortir la richesse du modèle grâce à l'*études des courbes delta lognormales* sous-jacentes. Le chapitre 3 correspond ainsi à l'étape 2: *comprendre et étudier le modèle*. Dans ce chapitre, on fera une présentation des courbes delta lognormales qui sont à l'origine du nom du modèle et des courbes lognormales élément constituant des premières. Ceci permettra de mieux comprendre ultérieurement les hypothèses qui vont être posées dans cette thèse pour donner une représentation des signatures.

Suite à cette *études des courbes delta lognormales*, dans le chapitre 4 nous verrons comment le modèle a été adapté aux signatures et au contexte particulier du domaine de la vérification de l'identité par la signature. Cette adaptation se fera en gardant à l'esprit l'aspect biométrique du problème. Ainsi, dans ce chapitre seront présentées les différentes hypothèses posées pour répondre à notre objectif. Suite à ces hypothèses, nous serons en mesure de donner une représentation des signatures basée sur le modèle delta lognormal. Ce chapitre correspond donc à l'étape 4: *donner une représentation des signatures*. Une fois celle-ci proposée, nous serons en mesure de proposer une description du geste de signer. Ensuite, nous verrons quelques implications de la représentation de la signatures comme: ses avantages et la variation de certaines caractéristiques du mouvement (la précision spatiale).

Le chapitre 5 présente la validation de la représentation des signatures basée sur le modèle de génération de mouvements rapides sous certaines hypothèses faites au chapitre précédent. Cette validation se fera par l'entremise d'un système de vérification de signatures déjà existant sur une banque de 220 signatures – provenant de 22 individus – contenant des spécimens arabe, chinois, européen et nord-américain. Avec

le traitement complet de la banque, nous serons en mesure de donner une estimation du taux de compression que l'on peut obtenir avec la représentation.

Finalement nous concluons avec le chapitre 6, en résumant les objectifs principaux, en soulignant la contribution originale et en montrant les perspectives liées à la représentation des signatures proposée dans cette thèse.

Chapitre 2

PRÉSENTATION DU MODÈLE

Ce chapitre est composé de deux parties: une traitant de la justification du choix du modèle, l'autre de son historique.

Dans l'historique, qui constitue la plus grande partie de ce chapitre, le lecteur trouvera l'évolution du modèle avant qu'il ne prenne sa forme actuelle ou plus précisément, la forme utilisée dans cette thèse. Cette évolution a suivi dans le temps une partie des travaux de cette thèse, puisqu'au début de celle-ci, le modèle de génération de mouvements rapides était un générateur de courbes lognormales¹. De plus, ayant travaillé sur la version précédente du modèle (le générateur de gaussiennes asymétriques), ceci m'a permis de couvrir quasiment toute l'évolution du modèle depuis sa création. Par conséquent, puisque cette thèse a dû s'adapter au gré de sa transformation, nous avons choisi de faire l'*historique du modèle* (section 2.2).

Malgré tout, l'intérêt principal de l'historique réside dans le fait qu'il permet d'introduire différentes notions importantes progressivement. Le but de ce chapitre étant de faire une *présentation du modèle*, l'historique permettra de l'atteindre. Finalement, le lecteur pourra apprécier le chemin parcouru depuis le début de cette thèse.

¹la suite de ce chapitre va donner des précisions sur ce modèle lognormal

2.1 Justification du choix

Comme il a été présenté dans l'introduction, pour aborder la vérification de signatures, deux alternatives sont envisageables selon que l'on considère l'espace de mesures ou l'espace individu. Notre choix portant sur l'espace individu, il est nécessaire d'avoir un modèle pour représenter le processus de génération de signatures en considérant l'ensemble neuromusculaire cerveau-bras-main comme un système.

Deux choix sont possibles:

- concevoir un modèle spécifique à la vérification de signatures;
- utiliser un modèle plus “*universel*” et l'adapter au contexte de la vérification de signatures.

Dans le cadre de ces travaux, c'est le deuxième choix qui a été retenu. À partir de cette étape, normalement il serait nécessaire de rechercher dans la littérature, les différents modèles existants. Après cette étape, un ou plusieurs critères devraient permettre de faire une sélection afin de retenir le meilleur candidat. Ces dernières étapes ne seront pas abordées. Deux aspects justifient leur absence:

1. Le laboratoire Scribens – où se sont effectués les travaux relatifs à cette thèse – s'est engagé dans des recherches en modélisation et un modèle² était par conséquent disponible. Ce modèle étant “*universel*”, c'est-à-dire conçu pour la génération de mouvements rapides et de tracés manuscrits mais ayant fait l'objet d'application restreinte, le but de cette thèse consistait en outre à tester son potentiel sur des tracés manuscrits de type signature. Conjointement, un collègue W. Guerfali a étudié l'intérêt de ce modèle dans le cadre de l'écriture manuscrite [22].

²à l'origine de cette thèse, il s'agissait du modèle lognormal, puis celui-ci à évoluer jusqu'à un modèle delta lognormal vectoriel.

2. Une étude comparative menée par R. Plamondon et *al* [79] et un autre collègue A. Alimi [2] a montré la supériorité du modèle de l'époque — basé sur la génération de delta lognormal — sur d'autres du même type.

Ces deux aspects justifient par conséquent l'utilisation du modèle de génération de mouvements rapides et de tracés manuscrits développé au laboratoire Scribens par R. Plamondon et des collaborateurs.

Pour renforcer la justification de ce choix, un historique du modèle présenté dans la suite de ce chapitre va permettre de montrer son évolution et sa maturité, résultat d'une quinzaine d'année d'effort. Cette historique servira également de présentation pour les grandes lignes du modèles dont le détail pourra être trouvé dans les articles qui seront cités.

2.2 Historique du modèle

La modélisation est un processus qui évolue continuellement. Généralement après une première modélisation, le potentiel du modèle est analysé. Pour cela, on évalue à la fois les résultats qu'il est capable de reproduire (qui doivent correspondre à ceux observés avec le système réel) et ce qu'il est capable de prédire. En fonction des résultats et des prédictions, une boucle de rétro-contrôle permet de faire des ajustements sur le modèle proposé.

Le modèle de génération de tracés manuscrits ou de mouvements rapides développé au laboratoire Scribens par R. Plamondon et plusieurs collaborateurs n'échappe pas à cette règle. Depuis le début de sa création, le modèle n'a cessé d'évoluer. Durant sa progression, c'est surtout l'équation utilisée pour modéliser la sortie du système neuromusculaire cerveau-bras-main qui a caractérisée ces différents stades d'évolution. Dans un ordre chronologique, le modèle a successivement été un générateur d'exponentielles, de gaussiennes, de lognormales, de lognormales bornées ou de delta lognormales.

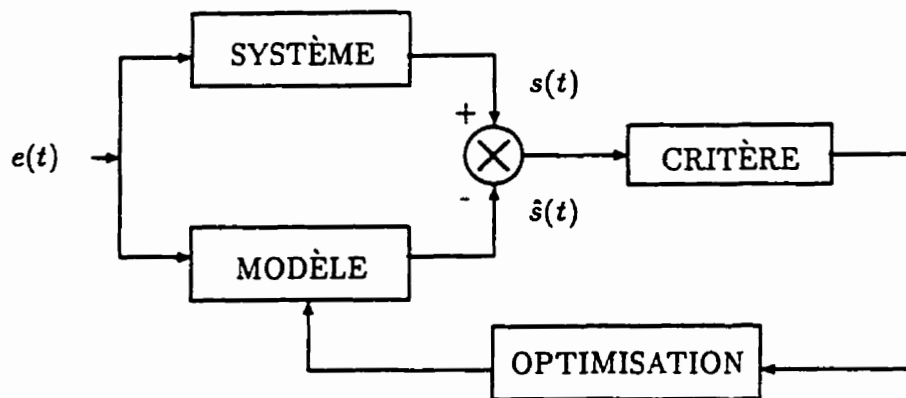


Figure 2.1: Schéma bloc de la modélisation

Dans la suite de ce chapitre, chacune des grandes étapes de développement du modèle de génération de mouvements rapides et de tracés manuscrits va être reprise. Une présentation pseudo-historique a volontairement été choisie. Elle permet à la fois de comprendre l'évolution du modèle, le pourquoi de sa forme actuelle tout en introduisant progressivement les points essentiels pour comprendre la suite de cette thèse. Enfin, il est à noter, que pour des raisons de commodité et pour ne pas alourdir le texte, par la suite nous avons décidé d'utiliser certaines conventions pour désigner les différents modèles. Par exemple pour désigner le *modèle générateur d'exponentielles* nous utiliserons plutôt la dénomination de *modèle exponentiel* et ceci pour tous ceux qui vont être présentés. De plus, lorsque nous utiliserons la dénomination de *modèle* sans préciser lequel il faudra comprendre modèle de génération de mouvements rapides et de tracés manuscrits.

Voici donc maintenant une exploration rapide de l'évolution du modèle de génération de mouvements rapides et de tracés manuscrits.

2.2.1 Modèle exponentiel

Les origines du modèle de génération de mouvements rapides et de tracés manuscrits remontent vers les années 80. En quelque sorte, celui-ci a vu le jour ou est né grâce à l'association de F. Lamarche et R. Plamondon. Dans le cadre d'une maîtrise, F. Lamarche s'est intéressé à la modélisation de l'écriture manuscrite en se basant sur un système conçu par Vredenburg et Koster [106] utilisant deux paires de moteurs couplés mécaniquement pour reproduire des tracés manuscrits. Dans ce premier modèle décrit par F. Lamarche [37], apparaissent déjà des notions qui vont être des éléments constants du modèle. Ainsi, le modèle proposé est basé sur une représentation des tracés manuscrits dans le domaine des vitesses. Il utilise à la fois la norme et la direction de ce vecteur. Donc, selon le même principe que celui utilisé par Vredenburg et Koster dans un repère cartésien, F. Lamarche a construit le modèle sur l'utilisation d'une paire de moteur pour l'orientation du crayon (direction du mouvement) et d'une autre paire pour le déplacement du crayon suivant cette orientation. Dans ces conditions il a montré que la fonction de transfert liant la commande d'entrée et la sortie (la vitesse) prend la forme d'un système du second ordre. Ensuite, selon certaines hypothèses, une fonction de transfert du premier ordre a été utilisée pour approcher ce système du second ordre [35, 36, 37]. Dans cette première version du modèle, la vitesse qui est générée prend la forme de l'équation (2.1), d'où la dénomination de *modèle exponentiel*.

$$v(t) = A(1 - e^{-\alpha t}) \quad (2.1)$$

avec:

v = vitesse

t = temps

A = terme proportionnel à l'amplitude de la commande d'entrée

α = constante de temps du système

Ce premier modèle a principalement été utilisé pour la segmentation de tracés

manuscripts associée à l'extraction de caractéristiques dans le cadre de la vérification de signatures [37]. Il a également servi pour de la compression de données [82]. Mais surtout, sa caractéristique principale a été de permettre la reproduction de la cinématique de l'écriture en utilisant les séquences de stimulation extraites par l'intermédiaire de ce modèle [35]. Enfin, comme nous l'avons déjà mentionné, il a permis de jeter les bases et a introduit des concepts théoriques qui se sont retrouvés dans les différents stades d'évolution du modèle. Ainsi, l'utilisation de la vitesse et de l'orientation du vecteur vitesse, introduits à cette époque, en font partie. Ce choix peut être supporté par les aspects théoriques de la géométrie différentielle, où une courbe est décrite par la courbure le long de l'abscisse curviligne [62, 64]. De rapprocher une façon de faire à des notions théoriques existantes a permis du même coup de conforter la description du modèle en lui donnant des bases plus solides. L'apport de la géométrie différentielle a ainsi permis de mieux le définir. De plus, cette première définition du modèle de génération de mouvements rapides et de tracés manuscrits concorde avec l'introduction de notions importantes telles que les chaînes et les composantes [62]. Une composante est une portion de tracé délimitée par des levées de crayon ou une vitesse nulle. À l'intérieur d'une composante, une chaîne est délimitée par les discontinuités observées dans les profils de vitesse angulaire (pics de fortes amplitudes).

Pour résumer cette première étape de modélisation, vers les années 85, le modèle est donc composé de deux parties, une responsable des déplacements du crayon, ceci par l'intermédiaire de la vitesse et une autre qui permet de contrôler l'orientation de ce mouvement, soit la variation de la direction en fonction du déplacement. La référence [63] donne un bon résumé de l'état du modèle de cette époque.

En marge de l'historique de ce modèle de génération de mouvements rapides et de tracés manuscrits qui nous intéresse, il est important de signaler des travaux particuliers, liés à la modélisation datant de ces mêmes années. À cette époque, la modélisation de la génération d'écriture était florissante. Comparer ces différents modèles

n'était pas une tâche facile compte tenu de la diversité de représentation des modèles décrits dans la littérature. Un travail de standardisation des différents modèles d'écriture, grâce aux transformations de Laplace, a permis à la fois de comparer ces modèles et à donner des définitions pour certains termes comme: stimulus, programme moteur, trait, composante, mot [86, 87]. De plus, cette comparaison a permis de montrer que parmi les modèles de cette époque ceux basés sur un contrôle de la vitesse produisaient les meilleurs résultats.

Les bases du modèle de génération de mouvements rapides et de tracés manuscrits étant jetées et une première évaluation de ce modèle ayant été réalisée, l'amélioration du modèle a pu commencer dans la deuxième moitié des années 80. Ainsi, le modèle exponentiel va subir une première modification et devenir un générateur de gaussiennes, l'objet de la section suivante.

2.2.2 Modèle gaussien

La première grande modification que va subir le modèle, est liée à l'observation des profils de vitesse. Ainsi, à cette époque, il était déjà connu que ces profils étaient constitués d'une suite de cloches très caractéristiques. Compte tenu de cette observation, le premier changement va consister à remplacer l'équation d'une exponentielle par celle d'une gaussienne. Donc, la fonction de transfert d'un système du premier ordre va être remplacée par la fonction de transfert d'un système générateur de gaussiennes. Ainsi, durant un séjour au laboratoire Scribens comme professeur invité, un professeur chinois de l'université de Pékin Li-de Yu a collaboré avec R. Plamondon sur l'étude et le développement du modèle générateur de gaussiennes. Malheureusement, la forme asymétriques des cloches observées sur les profils de vitesse, et la symétrie intrinsèque des gaussiennes va provoquer rapidement l'abandon du modèle gaussien au profit de celui que l'on qualifiera de modèle gaussien asymétrique. Ainsi, avec ce dernier, une cloche asymétrique sera caractérisée par deux demi-gaussiennes, une pour la phase active du mouvement (contraction musculaire) et une deuxième

pour la phase passive (élasticité du muscle).

La vitesse générée par cette deuxième version du modèle est donnée par l'équation (2.2). Dans cette équation, V_M résulte du produit du gain du système par l'amplitude de la commande d'entrée. L'indice i est placé pour indiquer que la valeur de τ change selon la phase active ou passive du mouvement.

$$v(t) = V_M e^{-(t-t_c)^2/\tau_i} \quad (2.2)$$

Suite aux travaux de Li-de Yu, le modèle gaussien asymétrique a pu être validé pour la reconstruction de 1500 traits manuscrits. Les paramètres extraits (V_M , t_c , τ_i) ont été étudiés de manière statistique afin d'analyser des informations telles que la direction du mouvement ou la connaissance d'indice sur la direction du mouvement. Cette expérience avait pour but de déterminer s'il existe des directions privilégiées dans la réalisation de traits manuscrits [81, 88, 91]. Donc dans ce cas on a cherché, avec l'aide du modèle et sous l'hypothèse que celui-ci reproduisait bien le processus de génération de traits manuscrits, à mieux connaître ce processus en question.

Après le départ de Li-de Yu, l'étude du modèle s'est poursuivie avec les travaux de F. Leclerc dans le cadre d'une maîtrise [38]. Le but de ces travaux était de valider ce modèle sur des tracés complexes plutôt que sur des traits rectilignes simples utilisés par le professeur Li-de Yu, et ceci en introduisant la partie angulaire décrite dans la théorie mais qui n'avait pas encore été explorée en pratique.

La validation du modèle complet s'est faite sur des signatures manuscrites, car ces tracés permettent de tenir compte d'une hypothèse de base du modèle, c'est-à-dire que les tracés doivent être *balistiques ou sans rétrocontrôle à l'intérieur d'une chaîne*. De plus dans ces travaux, la recherche des paramètres du modèle par minimisation d'un critère a été introduite, ce qui n'était pas le cas précédemment. Dans les travaux de Li-de Yu, les paramètres étaient soit:

- déduits directement des courbes de vitesse, tels t_c et V_M ;

- calculés, pour les valeurs de τ , en extrayant sa valeur à partir de la relation (2.2).

Le critère à minimiser qui a été choisi dans les travaux [38] est la somme des carrés des erreurs entre le tracé original et le tracé reconstruit et ceci pour les vitesses curviligne et angulaire. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode des moindres carrés appliqués aux équations non linéaires. Ces travaux ont montré qu'il était possible de reconstruire à la fois la statique et la cinématique de la signature avec une précision inégalée jusqu'alors par les autres modèles [40]. Ensuite, ce modèle gaussien asymétrique a également été utilisé pour de la segmentation [42].

Parallèlement, R. Plamondon et P. Yergeau ont validé ce même modèle sur de l'écriture grâce à un outil interactif [89]

Malgré les bonnes performances obtenues, il subsistait un problème de discontinuité qui pouvait apparaître à la jonction des 2 demi-gaussiennes si leurs valeurs de V_M n'étaient pas égales. Ceci pouvait se produire car il n'existait pas de contraintes pour les obliger à être égales. De plus il y avait pour chaque demi-gaussienne, une constante de décalage introduite surtout pour les profils de vitesse angulaire pour permettre d'obtenir des rotations à vitesse constante, phénomène observable sur certaines signatures.

L'étape suivante dans l'amélioration du modèle consistait donc à trouver une autre fonction mathématique de forme asymétrique pour éliminer les discontinuités introduites par le modèle gaussien asymétrique. Ceci nous conduit directement à l'étape suivante du modèle avec l'introduction de l'équation d'une lognormale, courbe dont le profil est intrinsèquement asymétrique.

2.2.3 Modèle lognormal

Le modèle lognormal est important dans l'historique du modèle de génération de mouvements rapides ou de tracés manuscrits. Ainsi, outre le fait que la courbe lognormale possède un profil intrinsèquement en cloche asymétrique, ce qui en fait

un très bon candidat pour reproduire les profils de vitesse observés, la genèse de la courbe lognormale va permettre maintenant d'expliquer celle des mouvements rapides [65, 66, 68]. Donc, de plus en plus, avec les modèles qui vont suivre (lognormale borné, delta lognormale), on ne cherche pas uniquement à reproduire fidèlement les cloches asymétriques des profils de vitesse par une équation mathématique (exponentielle ou gaussienne) mais on cherche aussi à expliquer l'origine de la génération d'une telle équation. Le modèle lognormal est donc à l'origine des recherches pour approfondir les connaissances sur la génération des mouvements rapides et sur l'interprétation de phénomènes observés par d'autres chercheurs comme Fitts, Schmidt et Newell [18, 19, 56, 57, 54, 53, 55, 98, 100, 101, 99].

Cependant cette période de l'historique du modèle peut confondre les personnes non familières avec les différents modèles. Ainsi, dans les publications [65, 66, 68] traitant du modèle lognormal (voir la référence [79]), celui-ci est basé sur l'équation (2.3). Cette dernière est plus proche de l'équation (2.4) d'une lognormale bornée que de l'équation (2.5) d'une courbe lognormale.

$$v(t) = \frac{\bar{V}(t_1 - t_0)}{\sigma\sqrt{2\pi}(t - t_0)} \exp - \left(\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln \left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \right) - \mu \right]^2 \right) \quad (2.3)$$

$$v(t) = \frac{(t_1 - t_0)}{\sigma\sqrt{2\pi}(t - t_0)(t_1 - t)} \exp - \left(\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln \left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0} \right) - \mu \right]^2 \right) \quad (2.4)$$

$$v(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}(t - t_0)} \exp - \left(\frac{1}{2\sigma^2} [\ln(t - t_0) - \mu]^2 \right) \quad (2.5)$$

Par conséquent, on peut dire qu'à cette époque, il existe deux versions du modèle lognormale:

- la première basée sur l'équation (2.3) [65, 66, 68],
- la deuxième basée sur l'équation (2.5) [74, 79].

C'est ainsi, qu'à partir d'une théorie basée sur l'utilisation du théorème central

limite [65, 66, 68], que R. Plamondon a proposé l'équation (2.6) décrivant le temps de mouvement (MT) comme une fonction des caractéristiques globales des générateurs de vitesse et cela en se basant sur l'équation (2.3). Cette relation conduit à une prédiction très importante: le temps de mouvement est lié à l'erreur relative spatiale $\Delta D/D$ par une loi de puissance grâce à l'équation (2.7) où K_2 et m sont des constantes. Exprimée en terme des paramètres du mouvement, cette équation peut prédire les données de Fitts [18] avec une meilleure précision que la *loi de Fitts* et donne une interprétation du compromis précision-vitesse [68].

$$MT = K_1 \sigma^n \quad (2.6)$$

$$MT = K_2 \left(\frac{\Delta D}{D} \right)^{-m} \quad (2.7)$$

Ensuite, par simple réécriture, R. Plamondon [68] a obtenu la relation (2.8) où K_3 est une constante. Cette équation prédit une relation linéaire entre l'erreur spatiale (ΔD) et le déplacement (D) comme rapporté par Schmit [98, 99, 100, 101] dans une étude où la précision spatiale et temporelle est requise.

$$\Delta D = K_3 \frac{D}{MT^{1/m}} \quad (2.8)$$

De plus, R. Plamondon [68] a démontré la relation (2.9) qui prédit que l'erreur temporelle peut être proportionnelle au temps de mouvement et que celle-ci augmente avec la distance (D), ce qui est en accord avec ce qu'on rapporté Schmit et Newell [56, 57, 54, 53, 55, 98, 99, 100, 101].

$$\Delta MT = m MT \left(\frac{dD}{D} - \frac{d^2 D}{dD} \right) \quad (2.9)$$

Outre le fait que le modèle lognormal reproduit fidèlement les profils de vitesse, son rôle prédictif de phénomènes observés par d'autres chercheurs en a fait à cette époque

le modèle le plus performant existant dans ce domaine. Malgré tout l'équation (2.3) est proche d'une lognormale bornée. Ainsi, une étude comparative sur 23 modèles — amorcée par P. Yergeau et complétées par A. Alimi (tous deux dirigés par R. Plamondon) — a montré que la courbe lognormale bornée est nettement supérieure. Le modèle lognormal borné constituait donc l'évolution inéluctable pour le modèle de génération de mouvements rapides ou de tracés manuscrits.

2.2.4 Modèle lognormal borné

Les modèles précédents permettent dès à présent de voir l'importance de la forme du profil généré par le modèle proposé (exponentiel, gaussien et lognormal). L'idée maintenant est donc de considérer différents profils similaires (cloche asymétrique) provenant d'équations mathématiques connues ou de modèle existant et, de les comparer tous ensemble sur une même banque de traits manuscrits. Car si maintenant le modèle lognormal permet d'expliquer certaines observations faites par Fitts, Smith et Newell, il semblait prudent, à ce stade d'évolution du modèle, de tester d'autres courbes capables de reproduire les profils de vitesse et qui elles aussi pourraient expliquer les mêmes phénomènes et peut être plus; le but ultime étant de continuer d'améliorer le modèle et nos connaissances sur les mouvements rapides.

Ainsi suite à l'étude mentionnée précédemment pour comparer 23 modèles ou équations différentes, la courbe lognormale bornée a montré une très nette supériorité sur toutes les autres équations y compris la courbe lognormale de l'équation (2.10). Cette constatation a influencé le passage du *modèle lognormal* au *modèle lognormal borné*. Ce changement a permis à R. Plamondon de reprendre sa démonstration sur les origines des profils de vitesse en considérant cette fois-ci une cascade de systèmes linéaires dont les temps de réponse sont liés par une loi de proportionnalité. En utilisant le *théorème de la limite centrale* la réponse impulsionnelle d'un tel système tend vers une courbe lognormale et compte tenu des résultats définitifs de la comparaison des 23 modèles [79], R. Plamondon est finalement arrivé au modèle lognormale

borné³ [70, 71]. De plus, dans l'article [74], R. Plamondon a spécifiquement comparé le modèle lognormal de l'équation (2.10) avec le modèle lognormal borné de l'équation (2.11) pour définitivement retenir le modèle lognormal borné.

$$v(t) = \frac{D}{\sigma\sqrt{2\pi}(t-t_0)} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} [\ln(t-t_0) - \mu]^2\right) \quad (2.10)$$

$$v(t) = \frac{D(t_1-t_0)}{\sigma\sqrt{2\pi}(t-t_0)(t_1-t)} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln\left(\frac{t-t_0}{t_1-t_0}\right) - \mu\right]^2\right) \quad (2.11)$$

Maintenant avec D_0 représentant la résolution spatiale du système globale, K une constante et MT_{\min} le temps de mouvement minimum, R. Plamondon a obtenu les relations (2.12), (2.13) et (2.14) qui permettent toujours de supporter les résultats de Fitts, Schmidt et Newell [18, 19, 56, 57, 54, 53, 55, 98, 100, 101, 99].

$$MT \approx \left(\frac{D}{D_0}\right)^{1/K} MT_{\min} \quad (2.12)$$

$$D_0 \approx \frac{MT_{\min}^k D}{MT^K} \quad (2.13)$$

$$dMT \approx \frac{MT}{K} \frac{dD}{D} \quad (2.14)$$

Malgré tout, si ce modèle se montre tout aussi explicatif pour les phénomènes observés sur les mouvements rapides [71] et d'une qualité de reproduction des profils de vitesse exceptionnelle [79], l'évolution du modèle ne s'est pas arrêtée là. Ainsi, sur la banque d'environ 1500 traits qui a servi à la comparaison des 23 modèles, seulement 1052 traits avaient été utilisés jusqu'à présent. Les autres traits présentaient des pics multiples sur les profils de vitesse, comme si au lieu d'avoir un mouvement simple,

³Il est bon de remarquer, que la démonstration de l'article [71] conduit à une courbe lognormale et non une lognormale bornée. Il faut plus qu'une loi de proportionnalité pour obtenir une lognormale bornée. L'annexe A page 191 donne comment à partir d'une loi quadratique liant les temps de réponse des sous-systèmes on peut parvenir à une lognormale bornée.

résultant d'une seule commande nerveuse, il s'agissait d'un mouvement composé de plusieurs commandes nerveuses. L'idée, pour considérer ces mouvements simples comme résultant d'une commande unique, a été de juxtaposer deux lognormales pour reproduire ces profils de vitesse à pics multiples, mais en gardant ces deux courbes synchrones. Cette nouvelle évolution va constituer le point de départ d'une nouvelle théorie proposée par R. Plamondon et d'une nouvelle équation pour la vitesse.

2.2.5 Modèle delta lognormal

Les sections précédentes viennent de montrer comment depuis les années 80, le modèle de génération de mouvements rapides ou de tracés manuscrits s'est raffiné pour devenir un modèle autant explicatif que prédictif en intégrant des notions de géométrie différentielle et des concepts tels que les chaînes et les composantes. Ainsi, en 1993, suite à l'évolution de nombreux travaux [3, 4, 38, 40, 42, 62, 64, 63, 81, 68, 91, 88, 71, 79], R. Plamondon a présenté une loi delta lognormale [72, 73, 75, 77, 78] permettant d'expliquer le processus de génération des mouvements simples et rapides.

Ce qui suit, présente un résumé des hypothèses de base pour cette loi delta lognormal.

hypothèse 1 Le modèle suppose un mouvement rapide programmé d'avance.

hypothèse 2 Le modèle décrit une synergie neuromusculaire. Il est composé de deux systèmes. Chacun d'eux représente l'ensemble des muscles et des nerfs impliqués dans la génération de l'activité des agonistes ou des antagonistes par un système linéaire invariant dans le temps. Ces systèmes sont commandés par une impulsion d'amplitude D_1 pour les agonistes et D_2 pour les antagonistes, se produisant au temps t_0 (synchrone). Chaque système produit alors en sortie un profil de vitesse en forme de cloche asymétrique. De nouveau en se basant sur le théorème de la limite centrale, R. Plamondon [72, 78] a montré que la réponse impulsionnelle d'une synergie peut s'exprimer par l'équation (2.15). La

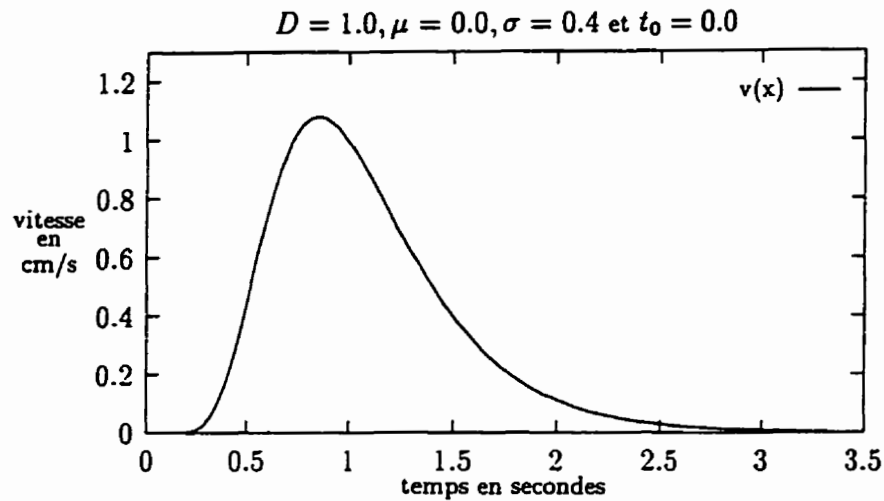


Figure 2.2: Réponse d'un système neuromusculaire (agoniste ou antagoniste) à une impulsion d'amplitude D au temps $t_0 = 0$.

figure 2.2 montre la forme de cloche asymétrique de la réponse d'un système à une impulsion d'amplitude D .

$$H(t - t_0) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}(t - t_0)} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}[\ln(t - t_0) - \mu]^2\right] \quad (2.15)$$

$$= \Lambda(t; t_0, \mu, \sigma^2) \quad (2.16)$$

hypothèse 3 le modèle suppose un contrôle dans le domaine des vitesses et, à cause de l'action opposée des deux systèmes, la vitesse résultante en sortie de la synergie peut s'exprimer par l'équation (2.17). Les figures 2.3 et 2.4 montrent les actions opposées des deux systèmes neuromusculaires et les formes caractéristiques que l'on retrouve dans les profils de vitesse pour des mouvements simples et rapides. La figure 2.4 montre plus particulièrement comment une seule commande peut générer un profil à deux pics. La référence [77] donne également d'autres

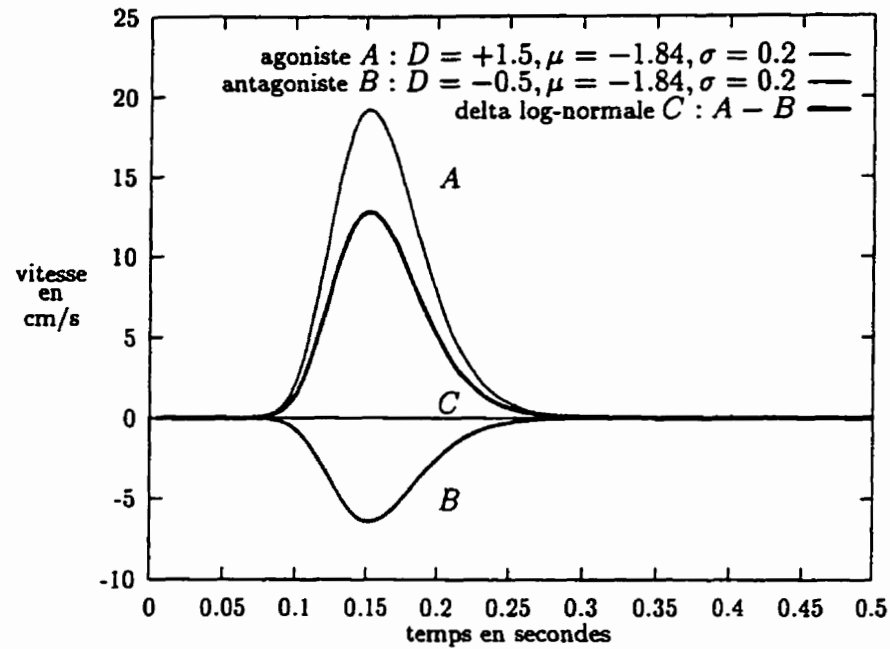


Figure 2.3: Profil de vitesse à 1 pic

formes caractéristiques des profils de vitesse avec entre autres des profils à trois pics.

$$v(t) = D_1 \Lambda(t; t_0, \mu_1, \sigma_1^2) - D_2 \Lambda(t; t_0, \mu_2, \sigma_2^2) \quad (2.17)$$

hypothèse 4 le modèle suppose que l'on travaille en géométrie différentielle pour obtenir des propriétés d'invariance en rotation et en translation. Donc, ce modèle considère que le mouvement résulte de la commande de deux systèmes neuromusculaires — formant une synergie — permettant de contrôler la vitesse curviligne et la vitesse angulaire (aspect de géométrie différentielle [62, 64]). Le calcul de la vitesse curviligne est présentée dans l'équation (2.18) et celui de la vitesse angulaire dans l'équation (2.19), où \dot{x} et \dot{y} représentent respectivement

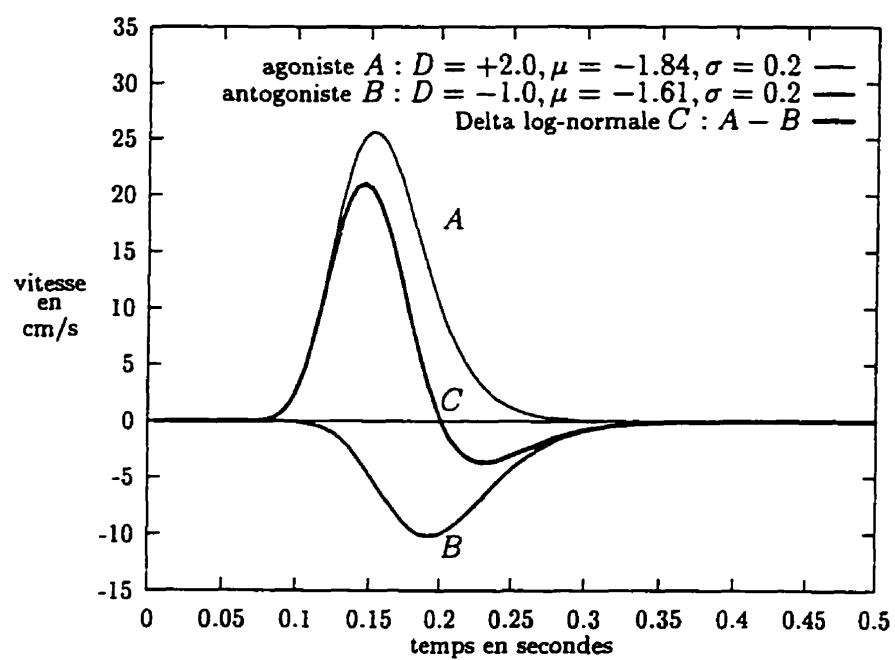


Figure 2.4: Profil de vitesse à deux pics

les dérivées premières de x et y et, \ddot{x} et \ddot{y} les dérivées secondes.

$$v_\sigma = \|\vec{v}\| = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (2.18)$$

$$v_\theta = \frac{\ddot{y}\dot{x} - \dot{y}\ddot{x}}{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = \frac{\ddot{y}\dot{x} - \dot{y}\ddot{x}}{v_\sigma^2} \quad (2.19)$$

À partir de ce nouveau modèle delta lognormal, R. Plamondon a montré avec l'équation (2.20) que le rapport des amplitudes des commandes impulsives entre les systèmes agoniste et antagoniste est proportionnel à l'erreur spatiale relative [78].

$$\left(\frac{D_2}{D_1}\right)_{\max} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \left(\frac{\Delta D}{D}\right)_{\max} \quad (2.20)$$

Ainsi, la théorie prédit grâce à l'équation (2.21) qu'une loi quadratique peut maintenant être observée entre le logarithme du temps de mouvement ⁴ (MT) et le logarithme de l'inverse de l'erreur spatiale relative.

$$a_1 \ln^2(MT_{\min}) + a_2 \ln(MT_{\min}) + a_3 - \ln\left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right) = \ln\left(\frac{D}{\Delta D}\right) \quad (2.21)$$

Cette loi quadratique peut se réduire sous certaines conditions (voir article [78]) à une loi de puissance donnée par l'équation (2.22), ce qui est en accord avec les observations faites avec les modèles précédents où le temps de réponse et la précision étaient déjà liés par une loi de puissance.

$$MT_{\min} = K_1 \left(\frac{D}{\Delta D}\right)^\alpha \quad (2.22)$$

La théorie cinématique de R. Plamondon permet aussi de prédire différentes relations selon que l'on se place dans le cas quadratique ou de la loi de puissance. Ainsi, la prédiction d'une relation de proportionnalité entre ΔD et D est donnée par l'équation (2.23) dans le cas quadratique et par l'équation (2.24) dans le cas de la loi

⁴voir la note de R. Plamondon page 310 de la référence [78] à ce sujet

de puissance.

$$\Delta D = D e^{-\left\{a_1 \ln^2(MT_{min}) + a_2 \ln(MT_{min}) + a_3 - \ln\left(\frac{\pi}{2}\right)\right\}} \quad (2.23)$$

$$\Delta D = \sqrt[3]{\frac{K_1}{MT}} D \quad (2.24)$$

De même, pour des expériences nécessitant la même précision spatiale à différent temps, l'erreur temporelle absolue est donnée par la relation (2.25) dans le cas quadratique et la relation (2.26) pour la loi de puissance.

$$\Delta MT = \left(\frac{MT}{2a_1 \ln MT + a_2} \right) \frac{\Delta D}{D} \quad (2.25)$$

$$\Delta MT = \left(\frac{MT}{a_2} \right) \frac{\Delta D}{D} \quad (2.26)$$

Toutes ces équations sont en accord avec les observations faites par d'autres chercheurs [18, 19, 56, 57, 54, 53, 55, 98, 100, 101, 99]. Pour plus de précision et une description complète et détaillée du modèle delta lognormal il est conseillé de lire les publications [77, 78].

Avec le modèle delta lognormal tout semble parfait et il paraît difficile de faire mieux avec un autre modèle autant du point de vue prédictif qu'explicatif. Cependant, ce modèle n'a démontré son potentiel que sur des traits simples (banque de 1500 traits). De plus, malgré le concept de géométrie différentielle introduit dans ce modèle, la partie angulaire, constituée d'une synergie obéissant à la même loi delta lognormale, n'a pas pu être vérifiée malgré plusieurs tentatives de R. Plamondon et P. Yergeau.

Avec ce modèle, la généralisation pour des mouvements plus complexes formés de plusieurs commandes qui se suivent et faisant intervenir la partie angulaire, pose certains problèmes. Dans ce modèle, la composition des mouvements se fait par une sommation linéaire des amplitudes des différentes courbes delta lognormales en ré-

ponse à chaque commande. Cette sommation linéaire a été étudiée par W. Guerfali [22] dans le cas de mouvements oscillatoires. Cette étude, plus divers essais infructueux pour modéliser la partie angulaire par d'autres signaux (courbure, variation de la courbure, etc.) a finalement conduit R. Plamondon à conclure que la somme ou la composition des différents profils de vitesse devrait être vectorielle. De plus, comme montré en annexe B page 193 cette sommation vectorielle ne change rien dans le cas des mouvements simples, ce qui préserve tous les résultats de la théorie cinématique donnés dans les articles [77, 78]. Toutefois, cette sommation vectorielle permet de résoudre simultanément deux problèmes: celui de la cohérence du modèle pour les mouvements oscillatoires (ou composés) et celui de l'aspect angulaire qui maintenant émerge de la description vectorielle des profils de vitesse.

2.2.6 Modèle delta lognormal vectoriel

Le modèle delta lognormal vectoriel décrit dans cette section, plus les notions introduites avec les modèles précédents, constitue ce qui va être à la base de la représentation des signatures dans cette thèse.

Pour commencer la description du modèle, nous allons préciser la notion de traits. Un trait est un tracé manuscrit généré par une commande nerveuse (commande impulsionnelle d'amplitude D_1 pour le système neuromusculaire agoniste et D_2 pour l'antagoniste) et dont le profil de vitesse suit une loi delta lognormale. De plus, fait très important et qui est introduit avec ce nouveau modèle vectoriel, le trait a une courbure constante ou nulle.

Dans ce qui suit, l'italique est utilisée pour citer un écrit non publié de R. Plamondon, ayant servi de base à ces travaux de doctorat. Cette citation permet de bien décrire le modèle actuel. La figure 2.5 en donne un schéma.

“Ce système génère des traits⁵ curvilignes possédant toutes les carac-

⁵ dans une direction initiale θ_0 et une courbure initiale C_0 .

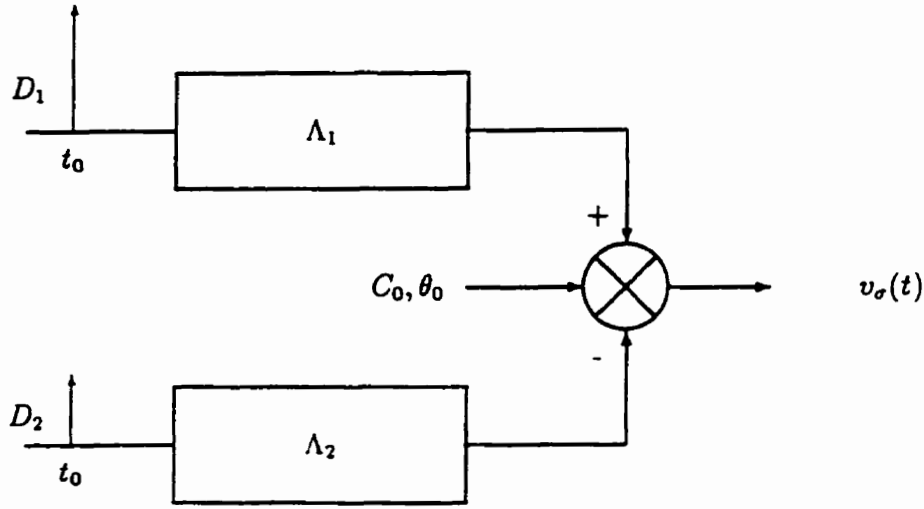


Figure 2.5: Schéma bloc du modèle delta lognormal vectoriel

téristiques psychophysiques prédites par les delta lognormals.

Pour produire un mouvement 2D continu, on superpose les traits et tout dépendant de l'importance de la superposition, la courbure du tracé, de même que la vitesse angulaire s'en trouvent modifiées. Ainsi, la vitesse angulaire n'est pas une propriété intrinsèque du tracé mais elle émerge suite à la superposition de traits curvilignes qui possèdent des conditions initiales C_{oi} , θ_{oi} définies par le système squelette musculaire mis en cause à chaque trait, à chaque synergie.

Ainsi, à un instant donné, la trajectoire de la pointe de la plume reflète la superposition de deux (ou plusieurs?) traits, chacun étant caractérisé par une delta lognormale à 7 paramètres et deux paramètres de conditions initiales C_o , θ_o . Donc en tout point de la trajectoire:

$$\vec{v}_{\sigma R} = \vec{v}_{\sigma 1} + \vec{v}_{\sigma 2} \quad (2.27)$$

où $\vec{v}_{\sigma R}$ est tangent à la trajectoire résultante et $\vec{v}_{\sigma 1}$, $\vec{v}_{\sigma 2}$ sont tangents aux traits constituants”.

Attention, dans les équations précédentes, les indices 1 et 2 ne sont pas liés aux agonistes et antagonistes. Il indique plutôt le trait #1 et le trait #2.

Avec la description qui précède, on constate qu’un tracé manuscrit, tel une signature ou une lettre, sera le résultat d’une sommation vectorielle dans le domaine des vitesses des différents traits le constituant.

De plus, avec ce nouveau modèle apparaît une notion très importante qui va être très utile dans cette thèse, c’est la notion de cibles virtuelles déjà abordée par des chercheurs tel J. J. Brault [11, 12, 13], P. Morasso [49]. Ainsi, lors de la génération d’un trait, tout se passe comme si l’on visait une cible virtuelle et *“en situation de mouvement appris, le sujet sait par la loi de puissance que la cible sera atteinte à $\pm\Delta D$ de précision dans un temps MT .”*

Par conséquent, si la commande d’un autre trait se fait avant que le MT soit écoulé, le tracé n’atteint pas la cible virtuelle. Toutefois, tout se passe comme si la cible virtuelle avait été atteinte et le mouvement se termine sur la cible du deuxième trait avec une précision $\pm\Delta D$, et ceci de la même façon que si le trait avait été généré à partir de la cible virtuelle précédente.

Pour préciser cette nouvelle notion, nous donnons un exemple concret, illustré par la figure 2.6. Pour cet exemple, considérons deux traits curvilignes et deux cibles virtuelles. En absence de superposition, le premier trait atteindra sa cible virtuelle (#1) avec une précision $\pm\Delta D_{\#1}$ en un temps $MT_{\#1}$. Maintenant, à partir de cette cible virtuelle #1, le deuxième trait va atteindre la cible virtuelle #2 avec une précision $\pm\Delta D_{\#2}$ en un temps $MT_{\#2}$. Donc sans superposition on constate sur la figure 2.6 que le tracé est discontinu et passe par la cible virtuelle intermédiaire (la cible #1).

Par contre, si maintenant on enclenche le mouvement du deuxième trait avant que $MT_{\#1}$ soit fini, on constate qu’une superposition des traits (voir figure 2.6) entraîne un éloignement du tracé de la cible virtuelle, mais que le deuxième trait finit toujours

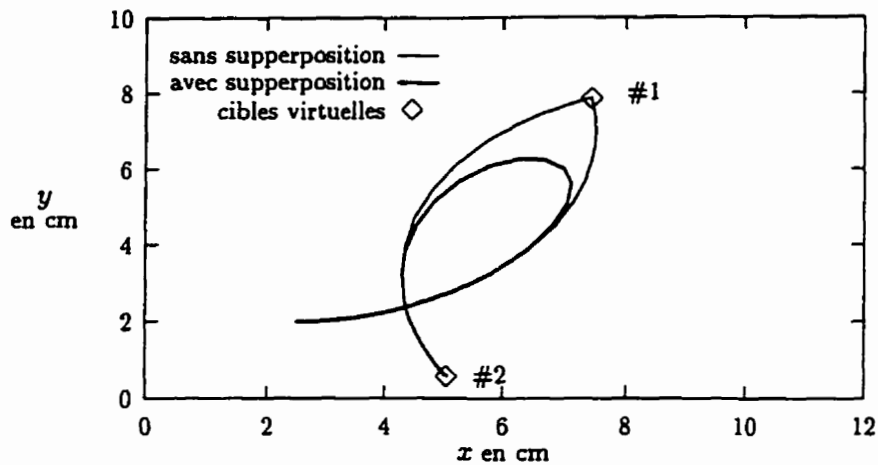


Figure 2.6: Somme de deux traits curvilignes.

sur la cible virtuelle #2 et ceci quelque soit la superposition. Ce phénomène est lié au propriété de la somme vectorielle, l'apport le plus important pour ce dernier modèle présenté dans l'historique.

La présentation du modèle vectoriel venant d'être faite, la conclusion de ce chapitre va faire un résumé des notions importantes pour la suite des travaux.

2.3 Conclusion

Pour résumer, trois aspects importants sont à retenir pour la suite de la présentation des travaux de cette thèse.

Le premier aspect c'est la loi delta lognormal, dans laquelle un mouvement résulte de l'activation de deux systèmes neuromusculaires agoniste et antagoniste (la synergie). Suite à son activation la synergie produit en sortie un profil delta lognormal dans le domaine des vitesses curvilignes. La section 2.2.5 page 27 traite de cette loi où les trois premières hypothèses de base constituent l'essentiel de celle-ci. La quatrième

hypothèse est rendu obsolète par l'introduction de la sommation vectorielle. Voici de nouveau ces hypothèses pour mémoire. Celles-ci résument l'état actuel du modèle:

hypothèse 1 Le modèle suppose un mouvement rapide programmé d'avance.

hypothèse 2 Le modèle décrit une synergie neuromusculaire. Il est composé de deux systèmes. Chacun d'eux représente l'ensemble des muscles et des nerfs impliqués dans la génération de l'activité des agonistes ou des antagonistes par un système linéaire invariant dans le temps. Ces systèmes sont commandés par une impulsion d'amplitude D_1 pour les agonistes et D_2 pour les antagonistes, se produisant au temps t_0 (synchrone). Chaque système a une réponse impulsionnelle en forme de cloche asymétrique donnée par l'équation (2.15).

$$H(t - t_0) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}(t - t_0)} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} [\ln(t - t_0) - \mu]^2 \right] \quad (2.28)$$

$$= \Lambda(t; t_0, \mu, \sigma^2) \quad (2.29)$$

hypothèse 3 le modèle suppose un contrôle dans le domaine des vitesses curviligne et, à cause de l'action opposée des deux systèmes, le module de la vitesse résultante en sortie de la synergie peut s'exprimer par l'équation (2.17).

$$v(t) = D_1 \Lambda(t; t_0, \mu_1, \sigma_1^2) - D_2 \Lambda(t; t_0, \mu_2, \sigma_2^2) \quad (2.30)$$

Le deuxième aspect important c'est justement le caractère vectoriel du modèle avec l'introduction de la notion de cible virtuelle. Celles-ci vont être exploitées pour retrouver ultérieurement la statique de signatures.

Enfin, le troisième aspect, c'est cette phrase importante donnée par R. Plamondon *"en situation de mouvement appris, le sujet sait par la loi de puissance que la cible sera atteinte à $\pm \Delta D$ de précision dans un temps MT^n "*

Les points importants venant d'être résumés, le chapitre suivant va aborder plus finement le modèle de génération de mouvements rapides: le modèle vectoriel, par une étude des courbes delta lognormales. Ces courbes constituent une pièce majeure dans l'édification de la représentation des signatures.

Chapitre 3

ÉTUDE DES COURBES DELTA LOGNORMALES

Suite à la présentation de l'historique du modèle de génération de mouvements rapides, ce chapitre vise à mieux faire connaître le modèle vectoriel à travers l'étude d'un mouvement simple. Comme il a été montré dans la fin du chapitre 2, l'activation d'un système neuromusculaire par une commande D_1 pour les agonistes et D_2 pour les antagonistes, produit à la sortie d'une synergie une courbe de profil delta lognormal dans le domaine des vitesses curvilignes.

Dans le cas d'un mouvement simple, l'étude du modèle vectoriel peut se résumer à celle des courbes delta lognormales. Par conséquent, le lecteur trouvera dans ce chapitre une étude portant sur les courbes delta lognormales ainsi qu'une présentation des courbes lognormales qui sont à l'origine de la première. Ainsi, ce chapitre vise à dévoiler certains aspects important qui serviront ultérieurement dans le chapitre 4 pour la représentation des signatures. Celui-ci, montrera également au travers ces quelques pages la richesse des courbes delta lognormales qui sont à la base de la théorie cinématique de R. Plamondon [77, 78].

3.1 Courbes lognormales

Compte tenu de l'importance de la courbe lognormale dans les travaux de cette thèse, il est important de faire une exploration de ses origines, c'est à dire étudier la distribution du même nom.

La distribution lognormale dans sa forme la plus simple peut être définie comme la distribution d'une variable aléatoire dont le logarithme obéit à une loi normale [1, 102]. Une telle variable est nécessairement positive. La distribution lognormale dérive de la théorie des erreurs élémentaires combinées par un processus multiplicatif, de la même façon que la distribution normale dérive de la théorie des erreurs élémentaires combinées par addition.

McAlister apparaît, selon Aitchison et Brown [1], avoir été la première personne à mettre en place les éléments théoriques de la distribution lognormale. L'origine de cette distribution remonterait donc vers 1879 [46]. Ensuite en 1903, Kapteyn [31] a établie plus clairement la genèse de la distribution lognormale.

3.1.1 Lognormale à deux paramètres

3.1.1.1 Généralités

Une variable aléatoire positive X possède une distribution lognormale à deux paramètres μ et σ , si $Y = \ln(X)$ est normalement distribuée avec une moyenne μ et une variance σ^2 . La distribution lognormale à deux paramètres est notée $\Lambda(\mu, \sigma^2)$; la distribution normale correspondante est notée $N(\mu, \sigma^2)$.

La fonction de densité de probabilité de X ayant une distribution $\Lambda(\mu, \sigma^2)$ est donnée par l'équation (3.1), relation donnée dans la référence [102] page 2.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} \exp\left(-\frac{[\ln x - \mu]^2}{2\sigma^2}\right) & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

La fonction de densité de probabilité de la relation (3.1) pour une distribution

$\Lambda(\mu, \sigma^2)$ peut être écrite selon la relation (3.2), celle-ci a donc la même forme que celle pour $\Lambda(0, \sigma^2)$. Pour cette raison, μ est nommé *paramètre d'échelle temporelle*.

$$f(x; \mu, \sigma^2) = e^{-\mu} f(xe^{-\mu}; 0, \sigma^2) \quad (3.2)$$

L'effet du paramètre d'échelle temporelle μ peut être observé sur les figures 3.1 et 3.2. Sur ces deux figures on peut effectivement constater que les deux courbes ont exactement la même forme. La seule différence entre celles-ci, c'est le facteur 2 entre les échelles temporelles. Pour obtenir ce facteur 2 entre les échelles, nous avons utilisé la relation (3.2) dans laquelle nous avons posé $e^{-\mu} = 2$ ce qui permet de calculer $\mu = -\ln(2)$.

Dans une forme à deux paramètres, le mode, la médiane et la variance s'expriment respectivement par les relations (3.3), (3.4) et (3.5).

$$mode = \exp(\mu - \sigma^2) \quad (3.3)$$

$$médiane = \exp(\mu) \quad (3.4)$$

$$variance = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (3.5)$$

les facteurs de forme, coefficients d'asymétrie (β_1) et d'aplatissement (β_2) sont respectivement:

$$\beta_1 = (\omega - 1)(\omega + 2)^2 \quad (3.6)$$

$$\beta_2 = \omega^4 + 2\omega^3 + 3\omega^2 - 3 \quad (3.7)$$

où $\omega = \exp(\sigma^2)$. Comme les paramètres de forme β_1 et β_2 ne dépendent que de σ , celui-ci est communément appelé le *paramètre de forme* de la distribution lognormale. L'effet du paramètre de forme peut être observé sur la figure 3.3. Lorsque σ tend vers zéro, la distribution devient normale [102].

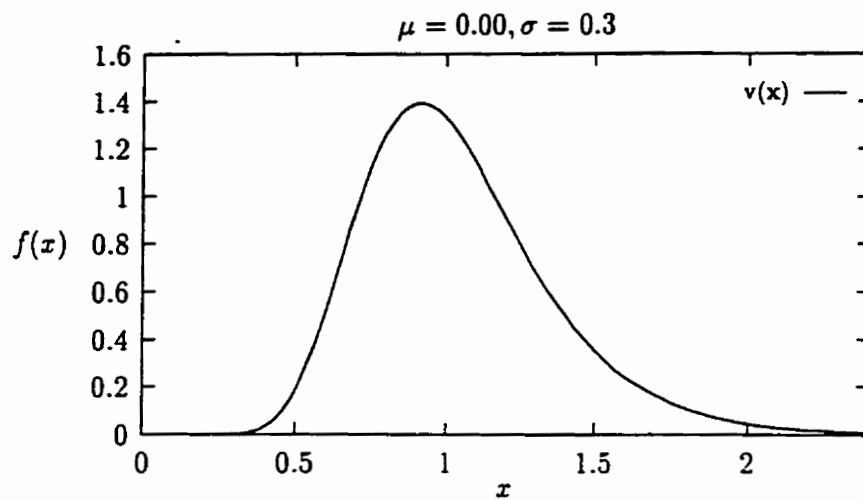


Figure 3.1: Effet du paramètre d'échelle temporelle, $\mu = 0$

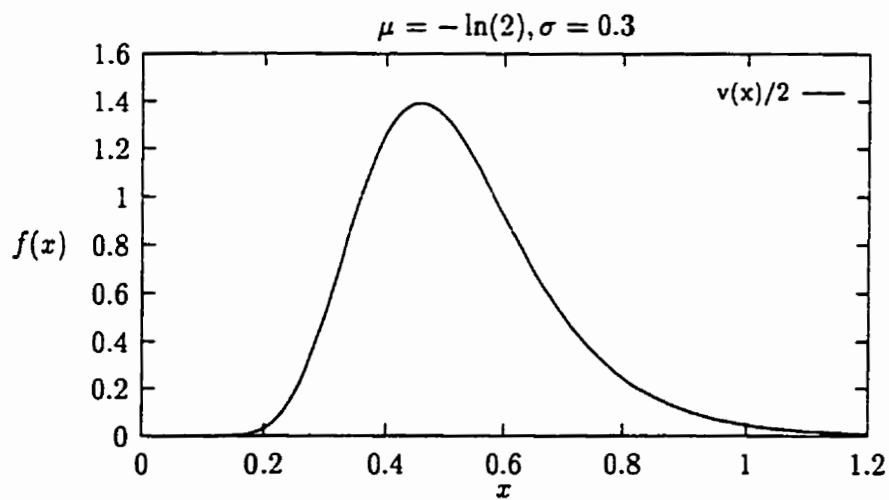


Figure 3.2: Effet du paramètre d'échelle temporelle, $\mu = -\ln(2)$

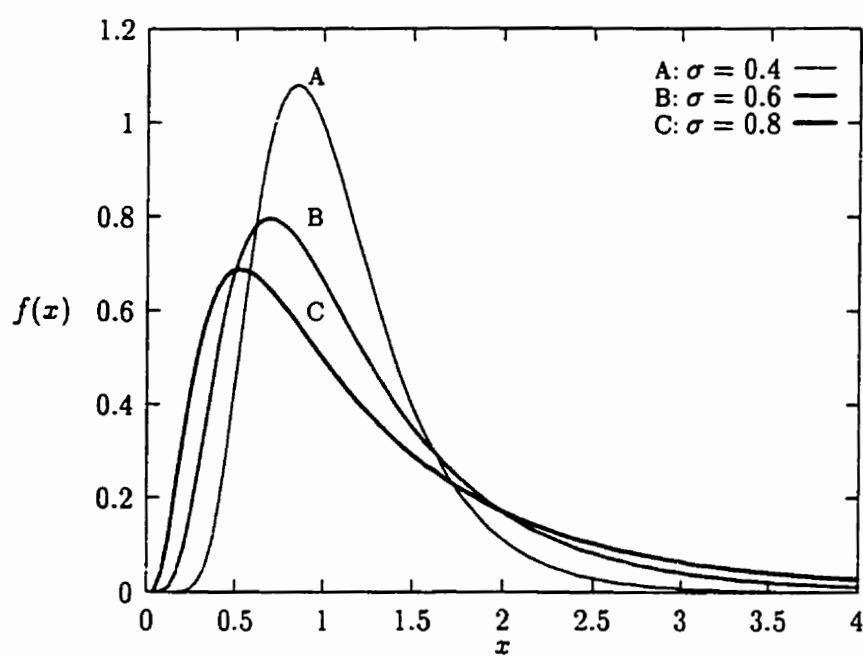


Figure 3.3: Effet du paramètre de forme σ avec $\mu = 0$

3.1.1.2 Genèse d'une lognormale à deux paramètres

De nombreux processus ont été imaginés pour générer la distribution lognormale. L'une d'entre elles est *la loi de l'effet proportionnel* ainsi appelée par Gibrat [21]. Supposons que l'on ait une variable initiale X_0 positive. L'équation considérée par Kapteyn [31] qui successivement calcule la j^{ieme} valeur de la variable X_j est:

$$X_j - X_{j-1} = \epsilon_j \phi(X_{j-1}) \quad (3.8)$$

où $\{\epsilon_j\}$ est un ensemble de variables aléatoires indépendantes et distribuées de façon identique, statistiquement indépendantes des X_j et où ϕ est une certaine fonction. Si on considère le cas spéciale où $\phi(X) = X$, le processus X_j est dit obéir à *la loi de l'effet proportionnel*. L'équation (3.8) peut maintenant s'écrire:

$$X_j = X_{j-1}(1 + \epsilon_j) \quad (3.9)$$

La génération de la distribution lognormale peut s'expliquer grossièrement de la manière suivante. La relation (3.9) conduit à:

$$X_n = X_0 \prod_{j=1}^n (1 + \epsilon_j) \quad (3.10)$$

Considérant que la valeur absolue de ϵ_j est petite comparée à 1 et en utilisant un développement de Taylor de $\ln(1 + x)$ alors:

$$\ln(X_n) = \ln(X_0) + \sum_{j=1}^n \epsilon_j \quad (3.11)$$

Par le théorème de la limite centrale, $\ln(X_n)$ est asymptotiquement normalement distribuée et par conséquent X_n est asymptotiquement distribué de manière lognormale dans une forme à deux paramètres. Le résultat suit rigoureusement une analogie multiplicative pour le théorème de la limite centrale. Ainsi, si $\{z_j\}$ est une séquence

de variables aléatoires positives indépendantes et identiquement distribuées, telles que:

$$E(\ln z_j) = \mu < \infty \quad (3.12)$$

$$\text{var}(\ln z_j) = \sigma^2 < \infty \quad (3.13)$$

alors le produit $\prod_{j=1}^n z_j$ est asymptotiquement distribué comme $\Lambda(n\mu, n\sigma^2)$.

3.1.2 Lognormale à trois paramètres

3.1.2.1 Généralités

Si une variable aléatoire X peut prendre n'importe quelle valeur excédant une valeur fixe τ , cette variable est dite être distribuée de manière lognormale avec trois paramètres τ, μ et σ^2 , si $Y = \ln(X - \tau)$ est normalement distribuée $N(\mu, \sigma^2)$. La distribution lognormale à trois paramètres est notée $\Lambda(\tau, \mu, \sigma^2)$. Le paramètre τ est nommé le *paramètre seuil*. La fonction de densité de probabilité de X devient alors:

$$f(x; \tau, \mu, \sigma) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(x-\tau)}} \exp\left(-\frac{[\ln(x-\tau)-\mu]^2}{2\sigma^2}\right) & x > \tau \\ 0 & x \leq \tau \end{cases} \quad (3.14)$$

Ainsi, la distribution lognormale à deux paramètres $\Lambda(\mu, \sigma^2)$ est un cas particulier de la distribution lognormale à trois paramètres $\Lambda(\tau, \mu, \sigma^2)$ pour laquelle $\tau = 0$.

Pour une distribution lognormale à trois paramètres le mode, la médiane et la variance s'expriment respectivement par les relations (3.15), (3.16) et (3.17):

$$\text{mode} = \tau + \exp(\mu - \sigma^2) \quad (3.15)$$

$$\text{médiane} = \tau + \exp(\mu) \quad (3.16)$$

$$\text{variance} = \tau + \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (3.17)$$

3.1.2.2 Genèse d'une lognormale à trois paramètres

La distribution lognormale à trois paramètres est générée à partir de la modification suivante:

$$X_j - X_{j-1} = \epsilon_j(X_{j-1} - \tau) \quad (3.18)$$

où on suppose que la variable aléatoire peut prendre n'importe quelle valeur dépassant une valeur seuil τ . L'équation peut être réécrite comme:

$$(X_j - \tau) - (X_{j-1} - \tau) = \epsilon_j(X_{j-1} - \tau) \quad (3.19)$$

Puisque X_n est asymptotiquement distribuée de manière lognormale, dans une forme à deux paramètres, alors par un simple changement de variable, X_n est asymptotiquement distribuée de manière lognormale dans une forme à trois paramètres.

3.1.3 Lognormale à quatre paramètres

Dans les sections précédentes, nous avons vu les fonctions de densité de probabilité d'une distribution lognormale à deux et trois paramètres. Dans cette section, nous présentons la courbe lognormale à quatre paramètres qui garde la même forme caractéristique des courbes des relations (3.1) et (3.14), mais cette fois l'aire sous la courbe n'est plus égale à l'unité. Donc, dans ce cas, nous n'avons plus l'équation d'une fonction de densité de probabilité et nous parlerons plutôt de courbe lognormale.

De plus, dans la suite de ce document, et comme nous l'avons déjà fait, nous utiliserons parfois le terme lognormale pour désigner soit une distribution lognormale ou une courbe lognormale afin d'alléger le texte.

L'équation d'une courbe lognormale à quatre paramètres peut s'exprimer par la relation (3.20). Dans cette relation le paramètre D sera nommé *paramètre d'amplitude*. Malgré tout, il faut noter que ce paramètre ne représente pas l'amplitude du maximum de la lognormale, mais un changement du paramètre D influence celle-ci.

$$f(x; D, \tau, \mu, \sigma) = \begin{cases} \frac{D}{\sqrt{2\pi\sigma(x-\tau)}} \exp\left(-\frac{[\ln(x-\tau)-\mu]^2}{2\sigma^2}\right) & x > \tau \\ 0 & x \leq \tau \end{cases} \quad (3.20)$$

Cette dernière équation permet de clore la description des courbes lognormales. Dans cette thèse, c'est principalement la forme à 4 paramètres qui est utilisée. Ainsi, dans l'équation (3.20), on reconnaît la réponse impulsionnelle d'un système neuro-musculaire agoniste ou antagoniste à une commande d'amplitude D .

3.2 Courbes delta lognormales

3.2.1 Études avec les μ et σ égaux

Dans ce premier cas, nous partons de la simplification extrême du modèle en considérant que $\mu = \mu_1 = \mu_2$ et $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$. Alors, la courbe delta lognormale peut s'écrire sous la forme de l'équation (3.23).

$$v(t - t_0) = D_1 \Lambda(t - t_0; \mu, \sigma^2) - D_2 \Lambda(t - t_0; \mu, \sigma^2) \quad (3.21)$$

$$v(t - t_0) = (D_1 - D_2) \Lambda(t - t_0; \mu, \sigma^2) \quad (3.22)$$

$$v(t - t_0) = \frac{D_1 - D_2}{\sigma\sqrt{2\pi}(t - t_0)} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}[\ln(t - t_0) - \mu]^2\right) \quad (3.23)$$

Dans ces conditions, on voit tout de suite que la courbe delta lognormale peut se résumer à une seule lognormale, du moins en ce qui à trait à l'extraction des paramètres. Donc, toutes les propriétés connues des lognormales peuvent se retrouver pour l'équation (3.23). Par conséquent, le paramètre μ est un paramètre d'échelle temporelle et σ un paramètre de forme. Ainsi, si dans certaines circonstances le modèle peut se simplifier et suivre ce premier cas, ceci veut dire par exemple, qu'en changeant le paramètre μ uniquement, on peut reproduire le même mouvement deux fois plus rapidement ou deux fois plus lentement. Dans le cas d'un mouvement du

bras, on peut donc obtenir exactement le même déplacement mais avec des durées différentes simplement en changeant le paramètre μ .

L'amplitude du mouvement D est obtenue par la différence entre les paramètres de commande D_1 et D_2 . Ainsi, en changeant ces paramètres on obtient des mouvements de différentes amplitudes. La figure 3.4 donne plusieurs profils de vitesse pour quatre valeurs distinctes des amplitudes du mouvement D avec μ et σ constants. Le tableau 3.1 donne les valeurs utilisées pour tracer les différentes courbes de la figure 3.4. Pour les courbes delta lognormales de la figure 3.4 on peut constater grâce au tableau 3.1 que la différence entre D_1 et D_2 change et que leur rapport $R = D_1/D_2$ est constant. Dans la suite de cette thèse, nous utiliserons souvent la notation R pour désigner le rapport D_1 sur D_2 .

3.2.2 Simplification avec σ égaux et μ différents

Dans ce deuxième cas, on considère que $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$ et que $\mu_1 \neq \mu_2$. Ceci nous permet d'écrire la relation (3.28).

$$v(t - t_0) = D_1 \Lambda(t - t_0; \mu_1, \sigma^2) - D_2 \Lambda(t - t_0; \mu_2, \sigma^2) \quad (3.24)$$

$$v(t - t_0) = \frac{D_1}{\sigma \sqrt{2\pi}(t - t_0)} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}[\ln(t - t_0) - \mu_1]^2\right) \quad (3.25)$$

$$- \frac{D_2}{\sigma \sqrt{2\pi}(t - t_0)} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}[\ln(t - t_0) - \mu_2]^2\right) \quad (3.26)$$

$$v(t - t_0) = \left[\frac{D_1(t - t_0)^{\frac{\mu_1}{\sigma^2}}}{\exp\left(\frac{\mu_1^2}{2\sigma^2}\right)} - \frac{D_2(t - t_0)^{\frac{\mu_2}{\sigma^2}}}{\exp\left(\frac{\mu_2^2}{2\sigma^2}\right)} \right] \Lambda(t - t_0; 0, \sigma^2) \quad (3.27)$$

$$v(t - t_0) = (t - t_0)^{\frac{\mu_1 - \mu_2}{\sigma^2}} \left[\frac{D_1(t - t_0)^{\frac{\mu_1 - \mu_2}{\sigma^2}}}{\exp\left(\frac{\mu_1^2}{2\sigma^2}\right)} - \frac{D_2}{\exp\left(\frac{\mu_2^2}{2\sigma^2}\right)} \right] \Lambda(t - t_0; 0, \sigma^2) \quad (3.28)$$

En posant $\mu_1 - \mu_2 = k\sigma^2$, on arrive finalement à la relation (3.29).

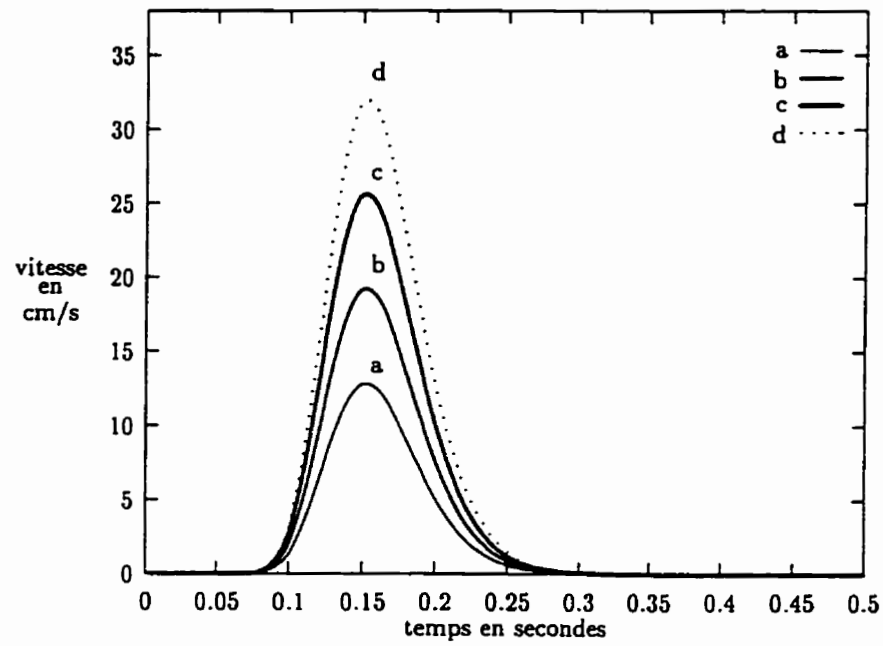


Figure 3.4: Courbes delta lognormales avec les μ et σ égaux

Tableau 3.1: Paramètres des delta lognormales de la figure 3.4

courbe	D	D_1	D_2	R	μ	σ
a	1.0	2.0	1.0	2.0	-1.84	0.2
b	1.5	3.0	1.5	2.0	-1.84	0.2
c	2.0	4.0	2.0	2.0	-1.84	0.2
d	2.5	5.0	2.5	2.0	-1.84	0.2

$$v(t - t_0) = (t - t_0)^{\frac{\mu_1}{\sigma^2} - k} \exp\left(-\frac{\mu_1^2}{2\sigma^2}\right) \beta(t - t_0) \Lambda(t - t_0; 0, \sigma^2) \quad (3.29)$$

avec:

$$\beta(t - t_0) = D_1(t - t_0)^k - D_2 \exp\left(k\mu_1 - \frac{k^2\sigma^2}{2}\right) \quad (3.30)$$

Dans ces conditions, on peut constater que la courbe delta lognormale peut couper l'axe des abscisses pour une certaine valeur T , si $\beta(t - t_0)$ s'annule. La valeur de T est donnée par la relation (3.31). Donc, à l'instar du cas précédent (section 3.2.1), la courbe delta lognormale peut couper l'axe des abscisses.

$$T = \exp\left[\frac{1}{k} \ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right) + \mu_1 - \frac{k}{2}\sigma^2\right] - t_0 \quad (3.31)$$

La valeur $MT = T - t_0$ correspondant à un paramètre particulier dans la réalisation d'un mouvement (voir document [73] page 4). Ainsi, à partir de la relation (3.31) on peut donner la relation (3.32) pour le calcul de MT (loi de puissance [78]).

$$MT = \exp\left[\frac{1}{k} \ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right) + \mu_1 - \frac{k}{2}\sigma^2\right] \quad (3.32)$$

En poursuivant les calculs, on peut écrire la relation (3.32) sous la forme d'un trinôme du second degré en k avec la relation (3.33).

$$\frac{\sigma^2}{2} k^2 + [\ln(MT) - \mu_1] k + \ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right) = 0 \quad (3.33)$$

En calculant le discriminant du trinôme (3.33) et en ne considérant que le cas d'une racine double, on obtient à partir du discriminant la relation (3.34), si $D_1 \geq D_2$, et pour la valeur de k correspondant à cette racine double la relation (3.35). Dans la relation (3.35), on peut constater que k ne dépend que de σ et D_1/D_2 . La figure 3.5 montre comment évolue k en fonction de σ et de D_1/D_2 pour des valeurs de σ allant de 0.1 à 1 et des rapports de D_1/D_2 de 1 à 10. Il est important de noter aussi que

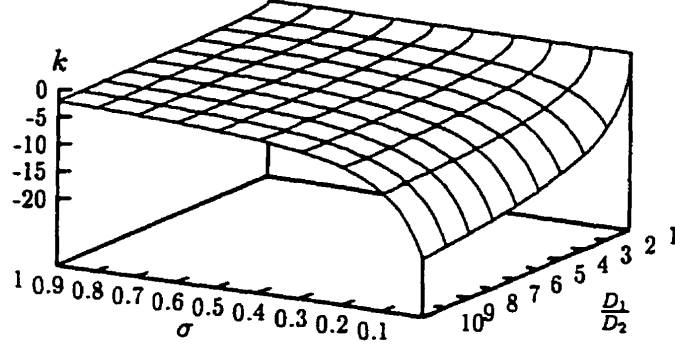


Figure 3.5: Évolution de k en fonction de D_1/D_2 et de σ

dans cette relation, la valeur de D_1 doit obligatoirement être supérieure ou égale à celle de D_2 .

$$\ln(MT) = \mu_1 + \sqrt{2\sigma^2 \ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right)} \quad (3.34)$$

$$k = \frac{\mu_1 - \ln(MT)}{\sigma^2} = -\frac{1}{\sigma} \sqrt{2 \ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right)} \quad (3.35)$$

Comme on a posé $\mu_1 - \mu_2 = k\sigma^2$, on déduit immédiatement de la relation (3.35) que $\mu_2 = \ln(MT)$. Ceci veut dire que c'est le paramètre μ_2 , lié au système neuromusculaire antagoniste, qui va être responsable de la durée du mouvement. De plus, avec la relation de $\mu_2 = \ln(MT)$ on peut déduire que pour des valeurs de durée de mouvement (MT) inférieures à une seconde, la valeur de μ_2 est nécessairement négative car le logarithme d'une valeur inférieure à 1 est négatif. De plus, ceci nous permet aussi d'écrire:

$$\mu_1 - \mu_2 = -\sigma \sqrt{2 \ln(R)} \quad (3.36)$$

comme

$$\sigma\sqrt{2\ln(R)} \geq 0 \quad (3.37)$$

alors

$$\mu_1 - \mu_2 \leq 0 \quad (3.38)$$

étant dans le cas où $\mu_1 \neq \mu_2$, on en déduit la relation (3.39).

$$\mu_1 < \mu_2 \quad (3.39)$$

Par conséquent, à partir de la relation (3.39) et sachant que μ_2 est généralement négatif, on en déduit que μ_1 sera aussi négatif et plus petit que μ_2 . Enfin, avec la relation (3.36) on peut voir que la différence des paramètres d'échelles temporelles μ_1 et μ_2 ne dépend que du paramètre de forme σ et du rapport des amplitudes des mouvements agonistes et antagonistes. La figure 3.6 montre comment évolue cette différence en fonction de ces deux paramètres dans le cas d'une racine double pour le trinôme de la relation (3.33).

Il existe un autre cas pour lequel on obtient aussi une racine double, celui de la relation (3.40). Contrairement au cas précédent, cette relation conduit à $\mu_1 > \mu_2$. Les différentes implications de cette relation qui produit des courbes du type de la figure 3.7 où on obtient un passage par zéro au début du mouvement ne seront pas considérées dans cette thèse. L'étude se limite aux cas où $\mu_1 < \mu_2$, puisque ce sont les seules qui vont être mis à profit pour donner la représentation des signatures. Néanmoins, l'étude du cas $\mu_1 < \mu_2$ peut facilement être transposée à celui où $\mu_1 > \mu_2$.

$$\ln(MT) = \mu_1 - \sqrt{2\sigma^2 \ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right)} \quad (3.40)$$

Enfin, la relation (3.34) va nous permettre de déduire une série de courbes delta lognormales pour lesquelles MT est constant. Dans la théorie de R. Plamondon, la valeur de MT est très importante. C'est grâce à sa connaissance, dans les mouvements

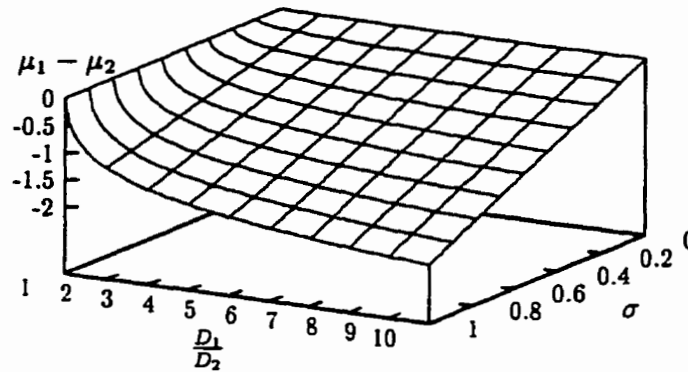


Figure 3.6: Évolution de la différence des paramètres μ_1 et μ_2 .

appris, que l'on est capable de déterminer quand enchaîner le mouvement suivant afin de générer des trajectoires fluides. C'est pourquoi, dans les sections suivantes, nous allons étudier les différentes possibilités pour garder MT constant, tout en changeant les paramètres impliqués dans la relation (3.34) et ceci pour des mouvements de mêmes amplitudes (D constant) ou de même précision (R constant).

3.2.2.1 Première possibilité pour garder MT constant

Dans cette première possibilité, nous considérons que l'amplitude du mouvement change tout en maintenant le rapport de D_1 et D_2 constant. Nous rappelons que le rapport D_1/D_2 fixe la précision avec laquelle un mouvement rapide atteint sa cible, dans un temps MT donné. Voici comment procéder pour obtenir les paramètres, tout en ayant MT fixé:

1. choisir un MT (exemple $MT = 0.2$ secondes),
2. calculer la valeur de μ_2 par la relation (3.41),

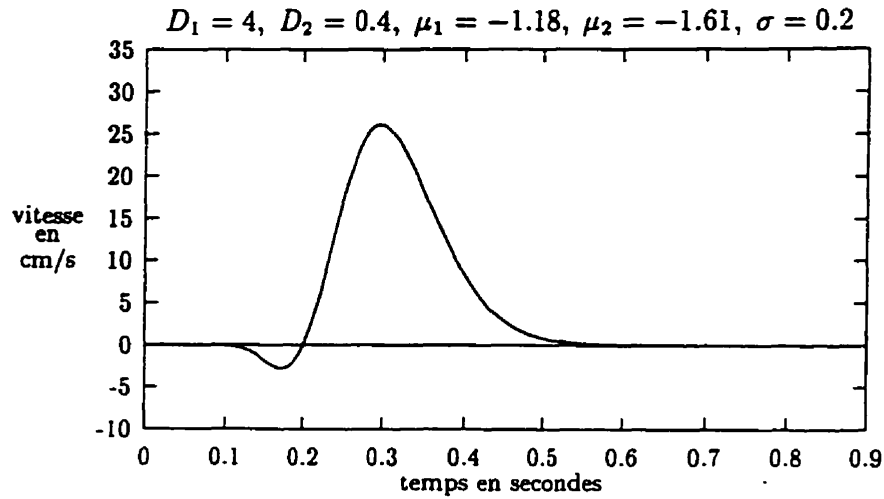


Figure 3.7: Cas du passage par zéro au début du mouvement.

3. choisir une valeur pour σ
4. choisir différents couples D_1 et D_2 tels que $D = D_1 - D_2$ varie et que $R = D_1/D_2$ soit constant,
5. Calculer la valeur de μ_1 par la relation (3.42).

$$\mu_2 = \ln(MT) \quad (3.41)$$

$$\mu_1 = \ln(MT) - \sqrt{2\sigma^2 \ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right)} \quad (3.42)$$

La figure 3.8 montre plusieurs courbes delta lognormales obtenues dans ces conditions. Le tableau 3.2 donne les valeurs des paramètres des courbes delta lognormales présentées dans la figure 3.8.

Les différentes courbes de la figure 3.8 sont à rapprocher de celles de la figure 4a de la référence [72]. Pour ces courbes, le V_{max} apparaît toujours au même temps

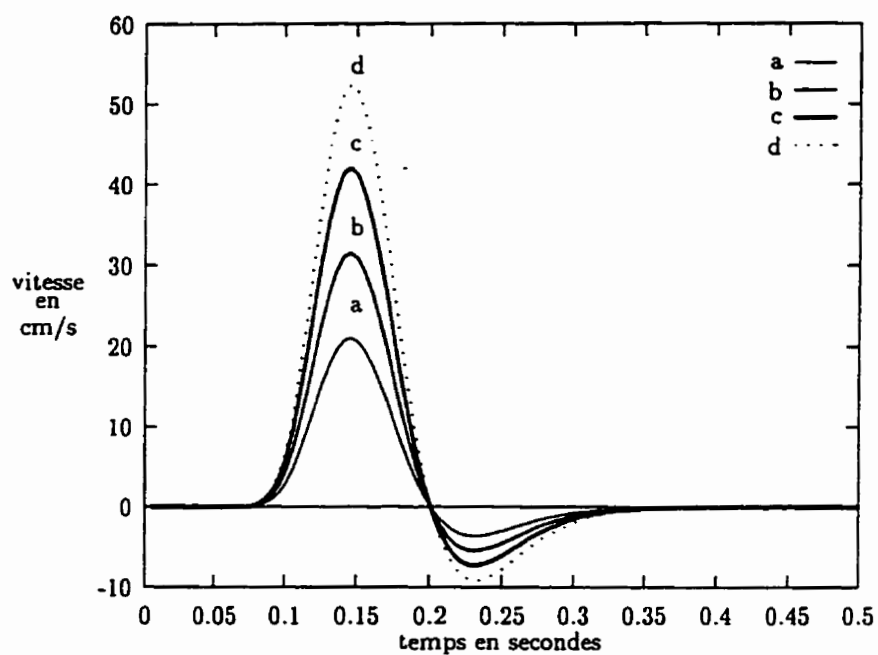


Figure 3.8: Courbes delta lognormales avec MT constant: première possibilité

Tableau 3.2: Paramètres des delta lognormales de la figure 3.8

courbe	D	D_1	D_2	R	μ_1	μ_2	σ
a	1.0	2.0	1.0	2.0	-1.84	-1.61	0.2
b	1.5	3.0	1.5	2.0	-1.84	-1.61	0.2
c	2.0	4.0	2.0	2.0	-1.84	-1.61	0.2
d	2.5	5.0	2.5	2.0	-1.84	-1.61	0.2

$t_{V_{max}}$ qui correspond au *mode* de l'agoniste. Comme μ_1 et σ sont constants, le temps $t_{V_{max}}$ est le même pour toutes les courbes. Ce qu'il faut retenir de ces courbes, c'est que pour atteindre des cibles dans un même temps MT et avec la même précision il suffit de changer uniquement la commande (D_1 et D_2), pour produire des mouvements d'amplitudes différents. La seule contrainte au niveau de la commande c'est de conserver un rapport entre D_1 et D_2 constant. Donc, si μ_1 et σ sont des paramètres caractéristiques du système neuromusculaire, ceci veut dire que pour un système donné — μ_1 et σ connu — un simple changement de la commande permet d'obtenir des mouvements d'amplitudes variées avec la même précision.

3.2.2.2 Deuxième possibilité pour garder MT constant

Dans cette deuxième possibilité, on fait varier σ tout en continuant de maintenir le rapport D_1/D_2 constant sur des mouvements d'amplitudes différentes. Toujours compte tenu de la relation (3.34), ceci veut dire que μ_1 va devoir varier de manière à conserver MT constant. Voici maintenant comment procéder pour obtenir les paramètres tout en ayant MT constant:

1. choisir un MT (exemple $MT = 0.2$ secondes),
2. calculer μ_2 par la relation (3.41),
3. choisir plusieurs valeurs pour σ
4. choisir différents couples (D_1, D_2) tels que leur rapport soit constant,
5. Calculer les valeurs de μ_1 correspondantes avec la relation (3.42), pour les différentes valeurs de σ .

La figure 3.9 montre les courbes delta lognormales obtenues dans ces conditions. Le tableau 3.3 donne les valeurs des paramètres des courbes delta lognormales présentées dans la figure 3.9. Dans la figure 3.9 on peut constater que l'amplitude du pic principale pour les différentes courbes passe par un minimum.

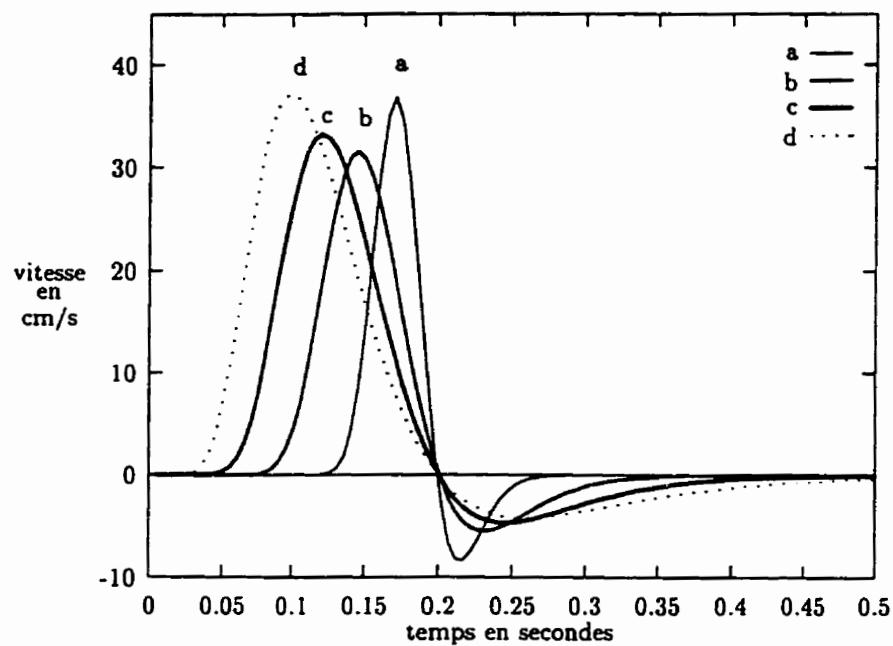


Figure 3.9: Courbes delta lognormales avec MT constant: deuxième possibilité

Tableau 3.3: Paramètres des delta lognormales de la figure 3.9

courbe	D	D_1	D_2	R	μ_1	μ_2	σ
a	1.0	2.0	1.0	2.0	-1.73	-1.61	0.1
b	1.5	3.0	1.5	2.0	-1.84	-1.61	0.2
c	2.0	4.0	2.0	2.0	-1.96	-1.61	0.3
d	2.5	5.0	2.5	2.0	-2.10	-1.61	0.4

Cette fois-ci les profils des courbes delta lognormales varient beaucoup plus comparés aux profils des courbes des figures précédentes. Ces grands changements entre les courbes sont dus aux variations relativement importantes de μ_1 et σ . Ces changements ont pour conséquence de faire varier de façon importante la valeur de $t_{V_{\max}}$, puisque celui-ci dépend de μ_1 et σ .

Cette deuxième possibilité donne une alternative pour produire les “*mêmes mouvements*” — en terme de MT et précision — que précédemment. Seulement on constate cette fois qu'un changement de la commande n'est pas suffisant pour maintenir MT et la précision constant. La variation de σ (ou *vice et versa*) entraîne une compensation par μ_1 . Si l'on fait un rapprochement avec la première possibilité, on peut conclure que si les caractéristiques du système neuromusculaire changent (μ_1 ou σ), à cause de la fatigue ou au autre, celui-ci peut s'adapter en compensant avec un autre paramètre.

3.2.2.3 Troisième possibilité pour garder MT constant

Dans cette troisième possibilité, on fixe l'amplitude du mouvement ainsi que la valeur de σ et on fait varier le rapport D_1 sur D_2 . Puisque MT est constant, le paramètre d'échelle temporelle attaché au système neuromusculaire agoniste doit changer pour s'adapter au changement de précision du mouvement. Voici comment procéder pour obtenir les valeurs des paramètres tout en ayant MT et D constants:

1. choisir un MT (exemple $MT = 0.2$ secondes),
2. calculer μ_2 par la relation (3.41),
3. choisir différents couples D_1 et D_2 en s'assurant que $D = D_1 - D_2$ soit constant et que D_1/D_2 ne le soit pas,
4. Calculer les différentes valeurs de μ_1 par la relation (3.42), ce qui permettra à MT de rester constant.

La figure 3.10 montre les courbes delta lognormales obtenues dans ces conditions. Le tableau 3.4 donne les valeurs des paramètres des courbes delta lognormales présentées dans la figure 3.10.

Donc cette fois-ci on constate que des mouvements simples qui à priori sont les mêmes selon des critères de durée et d'amplitude, peuvent être générés de différentes façons, entre autre avec une précision qui change. Vu sous un autre angle, si la précision d'un mouvement change, le paramètre μ_1 peut varier pour produire des mouvements de même MT et d'amplitude constante. Mais il est important de constater sur la figure 3.10, que lorsque la précision augmente, le mouvement est moins rapide. La courbe "a" a un maximum plus bas que la courbe "d". Ceci est en accord avec le dilemme *précision-vitesse*.

3.2.2.4 Quatrième possibilité pour garder MT constant

Dans cette quatrième possibilité, on fait de nouveau varier le rapport des amplitudes des mouvements agonistes et antagonistes et on laisse cette fois-ci le soin au paramètre de forme σ de s'adapter pour maintenir MT et D . Voici comment procéder pour obtenir que MT reste constant:

1. choisir un MT (exemple $MT = 0.2$ secondes),
2. calculer μ_2 par la relation (3.41),
3. faire varier $R = D_1/D_2$ en maintenant $D = D_1 - D_2$ constant,
4. choisir une valeur pour μ_1 ,
5. Calculer σ par la relation (3.43).

$$\sigma = (\mu_2 - \mu_1) / \sqrt{2 \ln \left(\frac{D_1}{D_2} \right)} \quad (3.43)$$

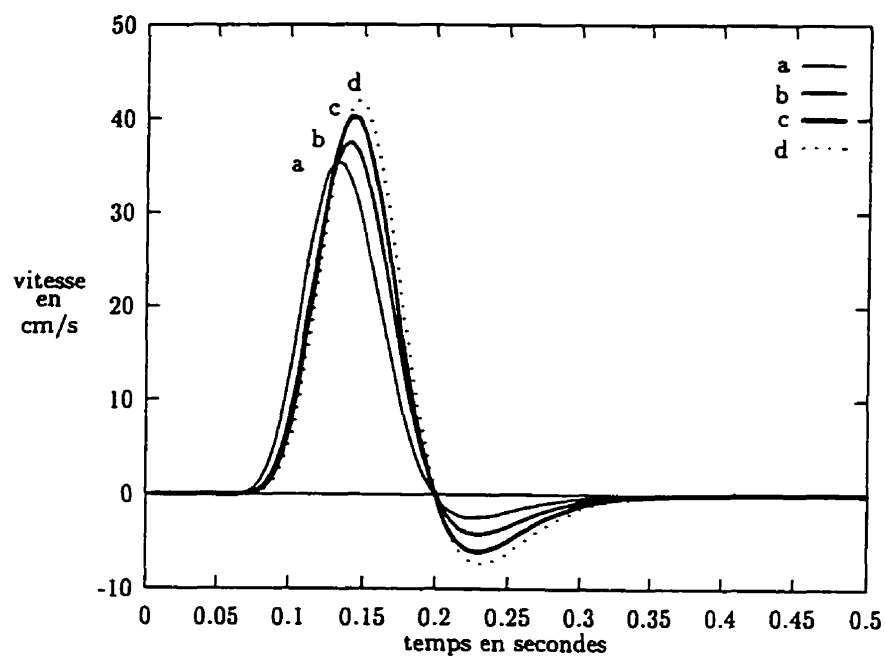


Figure 3.10: Courbes delta lognormales avec MT constant: troisième possibilité

Tableau 3.4: Paramètres des delta lognormales de la figure 3.10

courbe	D	D_1	D_2	R	μ_1	μ_2	σ
a	2.0	2.5	0.5	5.0	-1.97	-1.61	0.2
b	2.0	3.0	1.0	3.0	-1.90	-1.61	0.2
c	2.0	3.5	1.5	2.3	-1.87	-1.61	0.2
d	2.0	4.0	2.0	2.0	-1.84	-1.61	0.2

La figure 3.11 montre différentes courbes delta lognormales obtenues dans ces conditions. Le tableau 3.5 donne les valeurs des paramètres des courbes delta lognormales présentées dans la figure 3.11.

Cette fois-ci, on peut voir que les différentes courbes delta lognormales sont assez proches même si le rapport entre les commandes agonistes et antagonistes varie de manière relativement importante. Pour compenser les variations de R , le paramètre σ varie relativement peu, ce qui fait que les courbes se ressemblent beaucoup. Par contre, sur la figure 3.11, on peut constater un phénomène intéressant par rapport au dilemme *vitesse-précision*. Contrairement au cas précédent, la courbe "a", qui a la précision la plus grande, possèdent la vitesse la plus élevée. Ceci peut sembler paradoxal. Néanmoins, on peut constater que la courbe "a" possède l'amplitude du pic négatif le plus faible. C'est cette partie négative de la courbe qui est liée avec l'erreur commise pour atteindre une cible. Donc, ceci explique la meilleure précision du mouvement de la courbe "a".

3.2.2.5 Cinquième possibilité pour garder MT constant

Dans cette cinquième possibilité, l'amplitude du mouvement D ainsi que la précision restent constants. Par contre on fait varier le paramètre de forme σ , ce qui entraîne une variation du paramètre d'échelle de l'agoniste μ_1 afin de garder MT constant. Voici comment procéder:

1. choisir un MT (exemple $MT = 0.2$ secondes),
2. calculer μ_2 par la relation (3.41),
3. choisir D_1 et D_2 tels que $D = D_1 - D_2$ et R soient constants,
4. choisir différentes valeurs de σ ,
5. Calculer μ_1 par la relation (3.42).

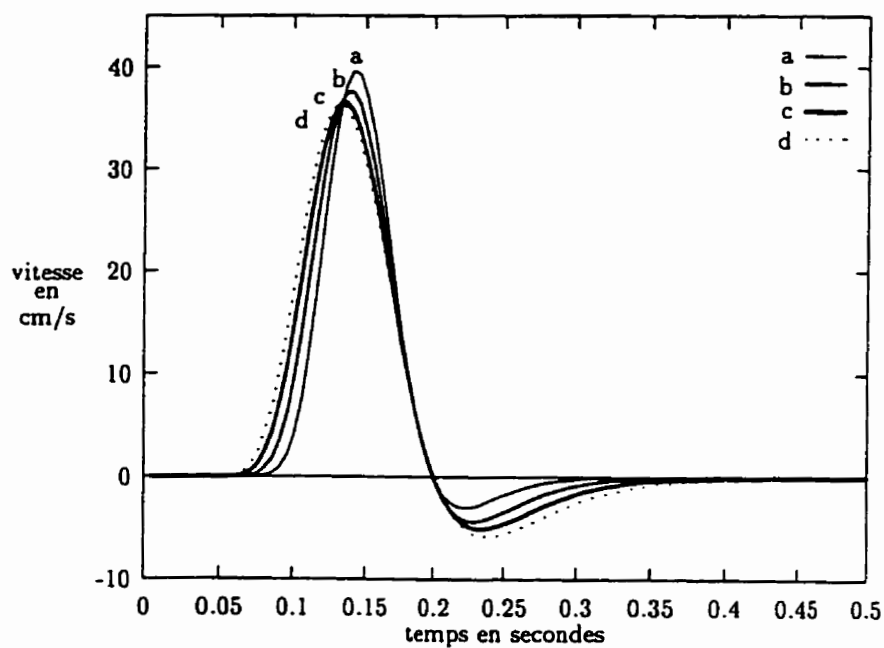


Figure 3.11: Courbes delta lognormales avec MT constant: quatrième possibilité

Tableau 3.5: Paramètres des delta lognormales de la figure 3.11

courbe	D	D_1	D_2	R	μ_1	μ_2	σ
a	2.0	2.5	0.5	5.0	-1.91	-1.61	0.167
b	2.0	3.0	1.0	3.0	-1.91	-1.61	0.202
c	2.0	3.5	1.5	2.3	-1.91	-1.61	0.232
d	2.0	4.0	2.0	2.0	-1.91	-1.61	0.255

La figure 3.12 montre différentes courbes delta lognormales obtenues dans ces conditions. Le tableau 3.6 donne les valeurs des paramètres des courbes delta lognormales présentées dans la figure 3.12.

Cette fois-ci, on peut constater que le paramètre μ_1 peut aussi évoluer afin de compenser une variation du paramètre de forme et maintenir D et MT constants. Dans ce cas, comme le paramètre de forme σ varie, les profils de vitesse sont très différents ce qui fait que les dynamiques du mouvement ne se ressemblent pas.

Ce qui peut surprendre dans ces courbes, c'est qu'elles ont toutes le même MT . Ainsi toutes ces courbes arrivent au même but ($D \pm \Delta D$) dans un même temps MT . Seulement, certaines courbes ont démarrées tranquillement mais sûrement (exemple: courbe d), alors que d'autres ont démarrées plus tardivement mais ont été plus vite pour parvenir au même résultat (exemple: courbe a). Ceci permet aussi de montrer la grande influence du paramètre σ dans la dynamique du mouvement. De plus, comme la précision, l'amplitude du mouvement et MT sont constants, on peut de nouveau conclure qu'une modification des paramètres neuromusculaires peut être compensée. Une variation de σ entraîne une compensation par μ_1 et *vice et versa*.

Pour conclure sur les différentes possibilités explorées précédemment, on peut constater globalement que les variations importantes dans les profils des courbes delta lognormales sont obtenues lorsque le paramètre σ varie de manière importante. Par contre quand σ est constant les courbes sont généralement très similaires.

Pour des mouvements ayant la même précision, il y a deux moyens de générer des mouvements d'amplitudes différentes ayant le même MT . Si μ_1 et σ sont fixés alors un simple changement de la commande permet de remplir ces conditions. Par contre si l'un de deux paramètres varie (μ ou σ) l'autre doit s'adapter.

Pour des mouvements de même amplitude avec des précisions différentes deux moyens sont également offerts pour garder MT constant. Soit faire varier μ_1 — σ reste constant — soit faire varier σ — μ_1 reste constant. Cette fois-ci la variation d'un seul paramètre suffit pour respecter les conditions fixées. Toutefois, σ ne représente pas un

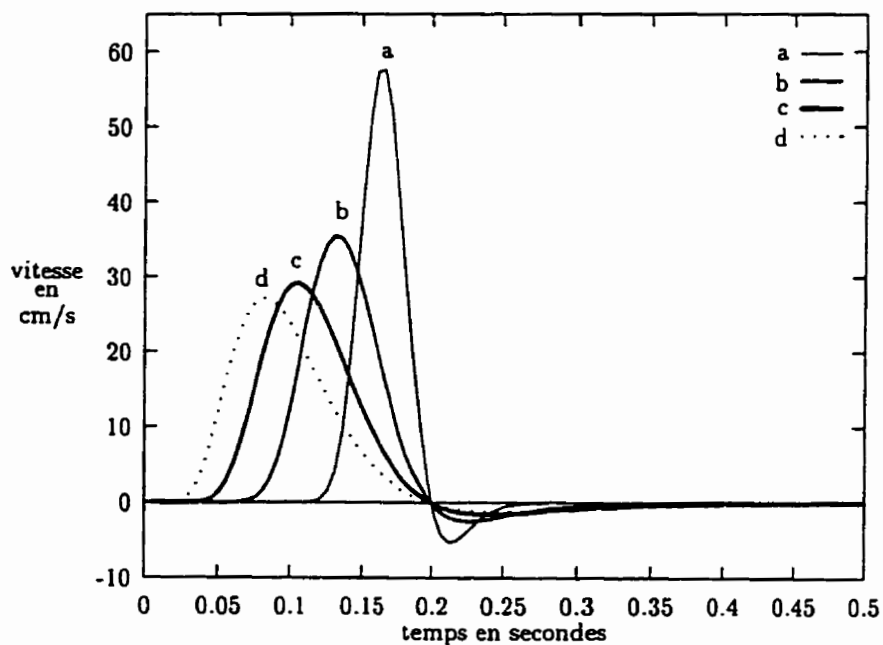


Figure 3.12: Courbes delta lognormales avec MT constant: cinquième possibilité

Tableau 3.6: Paramètres des delta lognormales de la figure 3.12

courbe	D	D_1	D_2	R	μ_1	μ_2	σ
a	2.0	2.5	0.5	5.0	-1.79	-1.61	0.1
b	2.0	2.5	0.5	5.0	-1.97	-1.61	0.2
c	2.0	2.5	0.5	5.0	-2.15	-1.61	0.3
d	2.0	2.5	0.5	5.0	-2.33	-1.61	0.4

paramètre, mais 2, puisque qu'il existe un σ pour chaque système neuromusculaire. Seulement dans les différentes possibilités que nous avons étudiés, nous étions dans le cas $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$. Donc en terme de stratégie de commande, il serait plus intéressant pour le système neuromusculaire d'avoir un seul paramètre à changer, μ_1 , plutôt que deux: les deux valeurs de σ .

Ceci termine l'étude d'une racine double dans le cas de σ égaux. Ces différentes possibilités ont permis de montrer la richesse des courbes delta lognormales, même dans un cas particulier comme celui que nous venons d'aborder.

3.2.2.6 Cas de deux racines du trinôme

Dans toutes les possibilités précédentes, nous nous sommes concentrés sur le cas simple d'une racine double pour la relation (3.33), dans le cas particulier où $\mu_1 < \mu_2$. Ceci nous a permis d'obtenir une relation directe entre MT et le système neuromusculaire antagoniste par la relation (3.41). Dans cette section, le cas où l'on obtient deux racines est exploré sans toutefois l'approfondir autant que le cas d'une racine double, ceci du fait d'une complexité croissante qui nous empêche de faire un lien direct entre MT et l'activité antagoniste.

Pour être dans le cas de deux racines pour la relation (3.33), il faut remplir l'une des conditions des relations (3.44) ou (3.45). Si l'une de ces conditions est satisfaite, on obtient pour le paramètre μ_2 deux valeurs possibles données par les relations (3.46) et (3.47) où Δ est le discriminant de la relation (3.33).

$$\mu_1 < \ln(MT) - \sigma \sqrt{2 \ln \left(\frac{D_1}{D_2} \right)} \quad (3.44)$$

$$\mu_1 > \ln(MT) + \sigma \sqrt{2 \ln \left(\frac{D_1}{D_2} \right)} \quad (3.45)$$

$$\mu_2 = \ln(MT) + \sqrt{\Delta} \quad (3.46)$$

$$\mu_2 = \ln(MT) - \sqrt{\Delta} \quad (3.47)$$

La condition (3.45) conduit à un passage par zéro au début du mouvement (voir figure 3.13), tandis que la relation (3.44) conduit à un passage par zéro à la fin du mouvement (voir figure 3.14). Le tableau 3.7 nous donne les valeurs des différents paramètres pour les courbes des figures 3.13 et 3.14. Ensuite, que ce soit à partir de la relation (3.46) ou (3.47), on obtient pour le logarithme de MT la même relation (3.48) en fonction des différents paramètres du modèle. Ainsi, on constate que dans le cas de deux racines, la durée du mouvement ne dépend plus cette fois-ci uniquement d'un seul système neuromusculaire: l'antagoniste, mais dépend de la synergie agoniste et antagoniste.

$$\ln(MT) = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} - \frac{\sigma^2}{\mu_1 - \mu_2} \ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right) \quad (3.48)$$

La complexité relative de la relation (3.48), tempère la tentation de faire une étude aussi exhaustive que dans le cas précédent avec la relation (3.34). Par contre, on peut simplifier légèrement l'écriture de la relation (3.48) en utilisant la moyenne des μ ($\bar{\mu}$), l'écart entre les μ ($\Delta\mu$) et le rapport de D_1 et D_2 (R) par la relation (3.49).

$$\ln(MT) = \bar{\mu} - \frac{\sigma^2}{\Delta\mu} \ln(R) \quad (3.49)$$

3.2.3 Aucune simplification

Dans cette section, on considère le cas le plus général, c'est à dire celui pour lequel $\sigma_1 \neq \sigma_2$ et $\mu_1 \neq \mu_2$. Ceci nous permet d'écrire la relation (3.50) que nous redonnons ici à titre d'information. Cette équation ne peut pas se simplifier comme dans les cas précédents. Néanmoins, il est possible de considérer la valeur de MT qui apparaît

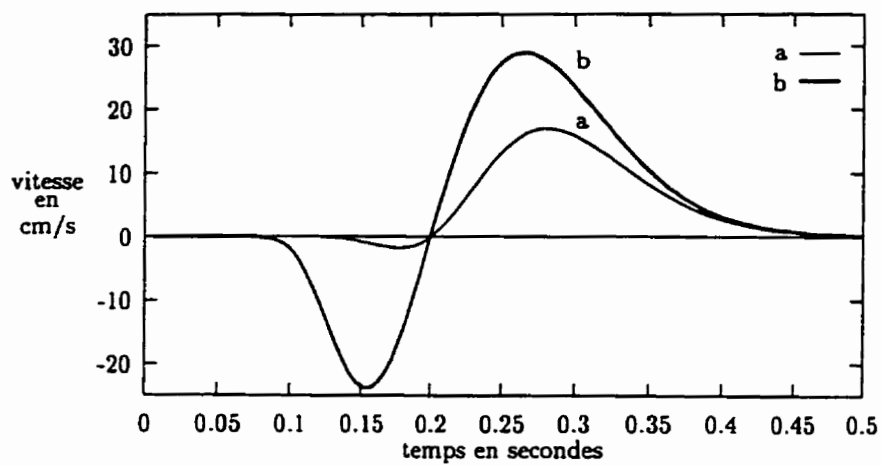


Figure 3.13: Passage par zéro au début du mouvement.

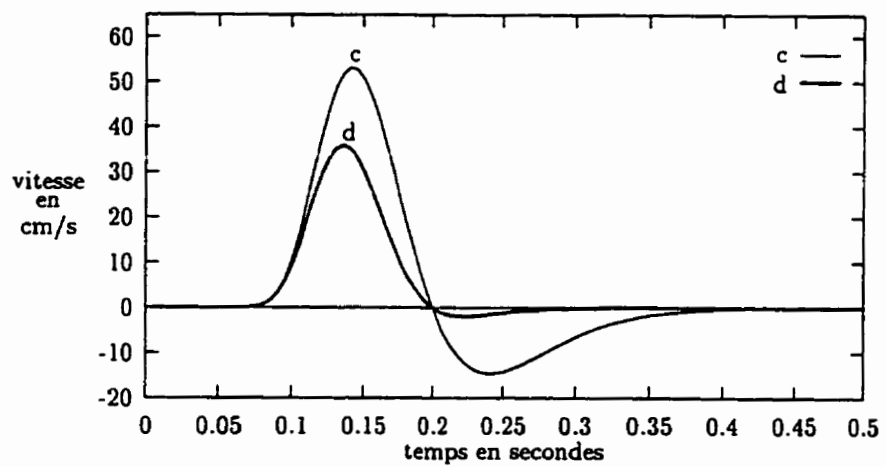


Figure 3.14: Passage par zéro à la fin du mouvement.

Tableau 3.7: Paramètres des delta lognormales des figures 3.13 et 3.14

courbe	D	D_1	D_2	R	μ_1	μ_2	σ
a	2.0	4.0	2.0	2.0	-1.30	-1.41	0.2
b	2.0	4.0	2.0	2.0	-1.30	-1.81	0.2
c	2.0	4.0	2.0	2.0	-1.90	-1.44	0.2
d	2.0	4.0	2.0	2.0	-1.90	-1.78	0.2

lorsque l'équation (3.50) est égale à zéro. Ceci nous permet d'écrire l'équation (3.53).

$$v(t - t_0) = D_1 \Lambda(t - t_0; \mu_1, \sigma_1^2) - D_2 \Lambda(t - t_0; \mu_2, \sigma_2^2) \quad (3.50)$$

$$D_1 \Lambda(MT; \mu_1, \sigma_1^2) - D_2 \Lambda(MT; \mu_2, \sigma_2^2) = 0 \quad (3.51)$$

$$D_1 \Lambda(MT; \mu_1, \sigma_1^2) = D_2 \Lambda(MT; \mu_2, \sigma_2^2) \quad (3.52)$$

$$\frac{D_1}{\sigma_1} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_1^2}[\ln(MT) - \mu_1]^2\right) = \frac{D_2}{\sigma_2} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_2^2}[\ln(MT) - \mu_2]^2\right) \quad (3.53)$$

Les membres de gauche et de droite de l'équation (3.53) étant positifs, on peut prendre le logarithme de chacun des membres, ce qui nous permet d'écrire:

$$\ln\left(\frac{D_1}{\sigma_1}\right) - \frac{1}{2\sigma_1^2}[\ln(MT) - \mu_1]^2 = \ln\left(\frac{D_2}{\sigma_2}\right) - \frac{1}{2\sigma_2^2}[\ln(MT) - \mu_2]^2 \quad (3.54)$$

l'équation (3.54) conduit à un trinôme du second degré en $\ln(MT)$ donnée dans la référence [73] et qui est:

$$a \ln^2(MT) + b \ln(MT) + c = 0 \quad (3.55)$$

avec:

$$a = \sigma_1^2 - \sigma_2^2 \quad (3.56)$$

$$b = 2(\mu_1\sigma_2^2 - \mu_2\sigma_1^2) \quad (3.57)$$

$$c = \mu_2^2\sigma_1^2 - \mu_1^2\sigma_2^2 + 2\sigma_1^2\sigma_2^2 \ln\left(\frac{D_1\sigma_2}{D_2\sigma_1}\right) \quad (3.58)$$

Comme nous sommes dans le cas $\sigma_1 \neq \sigma_2$, ceci implique que $a \neq 0$ et donc il existe soit une racine double (1 passage par zéro), soit deux racines réelles distinctes (2 passages par zéro) ou 2 racines imaginaires (pas de passage par zéro) pour le trinôme (3.55).

3.2.3.1 Discriminant nul

Si le discriminant Δ du trinôme (3.55) est nul, alors en posant $\Delta = b^2 - 4ac = 0$, on obtient la condition de l'équation (3.59) sur les paramètres du modèle.

$$(\mu_1 - \mu_2)^2 = 2(\sigma_1^2 - \sigma_2^2) \ln\left(\frac{D_1\sigma_2}{D_2\sigma_1}\right) \quad (3.59)$$

Dans ce cas, $\ln(MT)$ est donnée par l'égalité (3.60), et compte tenu de l'équation (3.59) on obtient finalement la relation (3.61).

$$\ln(MT) = \frac{2\mu_2\sigma_1^2 - 2\mu_1\sigma_2^2}{2(\sigma_1^2 - \sigma_2^2)} \quad (3.60)$$

$$\ln(MT) = \frac{2\mu_2\sigma_1^2 - 2\mu_1\sigma_2^2}{(\mu_1 - \mu_2)^2} \ln\left(\frac{D_1\sigma_2}{D_2\sigma_1}\right) \quad (3.61)$$

L'expression (3.61) diffère de celle donnée dans la référence [73] dans le cas d'une racine double. Pour obtenir la relation de cette référence, il faut se servir du fait que le discriminant est nul pour déduire la relation (3.63). Avec cette relation, outre le fait que a doit être différent de zéro (ce qui est le cas puisque $\sigma_1 \neq \sigma_2$), il faut s'assurer également que b soit différent de zéro. Si c'est le cas, alors on peut poser

l'équation (3.64) qui nous permet d'obtenir la relation de la référence [73]. Comme on peut le constater avec l'équation (3.64), l'expression de MT devient de plus en plus complexe.

$$b^2 = 4ac \quad (3.62)$$

$$\frac{b}{2a} = \frac{2c}{b} \quad (3.63)$$

$$\ln(MT) = \frac{\mu_1^2 \sigma_2^2 - \mu_2^2 \sigma_1^2}{\mu_1 \sigma_2^2 - \mu_2 \sigma_1^2} + \frac{2\sigma_1^2 \sigma_2^2}{\mu_2 \sigma_1^2 - \mu_1 \sigma_2^2} \ln \left(\frac{D_1 \sigma_2}{D_2 \sigma_1} \right) \quad (3.64)$$

3.2.3.2 Discriminant positif

Le cas du discriminant positif n'apporte pas de simplification. Comme nous cherchons à mieux connaître le modèle à travers des cas spécifiques, le discriminant positif n'offre pas d'éléments supplémentaires. Toutefois, il existe un cas particulier pour le discriminant positif. Celui-ci fait l'objet de la section suivante.

3.2.3.3 Cas des μ égaux et σ différents

Si dans le discriminant du trinôme (3.55) on pose $\mu_1 = \mu_2 = \mu$, on obtient la relation (3.65). Dans ce cas particulier, on constate que pour avoir le discriminant nul il faut soit que $\sigma_1 = \sigma_2$ ou que $D_1 \sigma_2 = D_2 \sigma_1$. Si $\sigma_1 = \sigma_2$ alors on se ramène au cas de la section 3.2.1 qui correspond à aucun passage par zéro. Par contre, si $D_1 \sigma_2 = D_2 \sigma_1$ on a un passage par zéro qui correspond au cas de la figure 3.15. Dans ce cas, le temps de mouvement MT est lié au paramètre μ uniquement, par la relation $\ln(MT) = \mu$ ce qui se rapproche du cas de la section 3.2.2.

D'autre part, si le discriminant est positif, on obtient la relation (3.68) pour le logarithme de MT . Dans ce cas on a deux passages par zéro, ce qui est illustré par la figure 3.16.

$$\Delta = 8(\sigma_2^2 - \sigma_1^2)\sigma_1^2\sigma_2^2 \ln\left(\frac{D_1\sigma_2}{D_2\sigma_1}\right) \quad (3.65)$$

$$\ln(MT) = \frac{2\mu(\sigma_1^2 - \sigma_2^2) \pm \sqrt{\Delta}}{2(\sigma_1^2 - \sigma_2^2)} \quad (3.66)$$

$$\ln(MT) = \mu \pm \frac{\sqrt{\Delta}}{2(\sigma_1^2 - \sigma_2^2)} \quad (3.67)$$

$$\ln(MT) = \mu \pm \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sqrt{\sigma_2^2 - \sigma_1^2}} \sqrt{2 \ln\left(\frac{D_1\sigma_2}{D_2\sigma_1}\right)} \quad (3.68)$$

Ceci termine l'étude des courbes delta lognormales et montre ainsi tout le potentiel que pour apporter une telle courbe au modèle vectoriel.

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous venons de décrire les courbes delta lognormales. Ceci revient à étudier la sortie du modèle vectoriel dans le cas de mouvements simples. Ainsi, nous avons montré que dans certaines circonstances (σ égaux et un passage par zéro de la courbe delta lognormale), le paramètre μ_2 peut être responsable de la durée MT du mouvement. Le paramètre μ_2 est lié au système neuromusculaire antagoniste. Par conséquent, on peut faire un lien direct entre le système antagoniste et la durée d'un mouvement.

Ce chapitre a également permis de montrer la richesse de cette courbe. Uniquement en changeant la valeur de quelques paramètres, elle peut engendrer une multitude de profils. De plus, pour certains types de mouvement — à amplitude constante ou à précision constante — il peut y avoir différentes stratégies pour conserver par exemple la durée du mouvement MT . Concrètement, ceci permet de montrer qu'un mouvement est entièrement déterminé par sa commande pour un ensemble de paramètres neuromusculaires connus (cas des mouvements appris). Mais si des change-

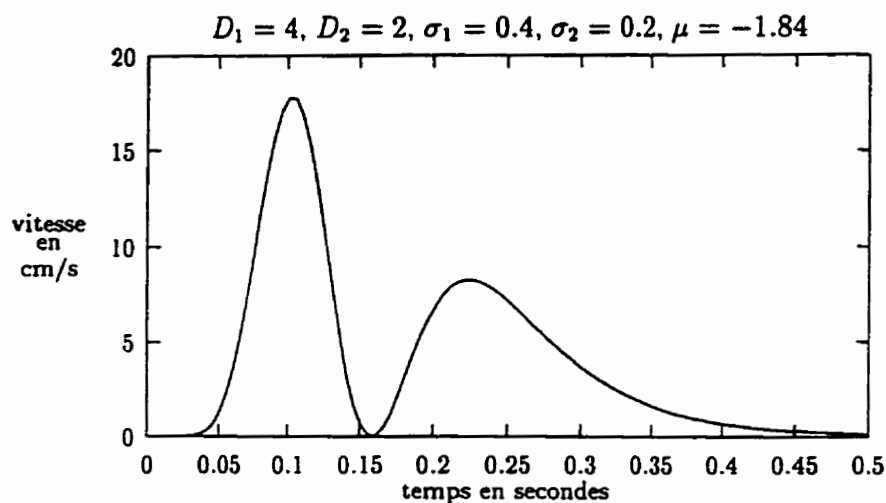


Figure 3.15: Un passage par zéro dans le cas des μ égaux et σ différents.

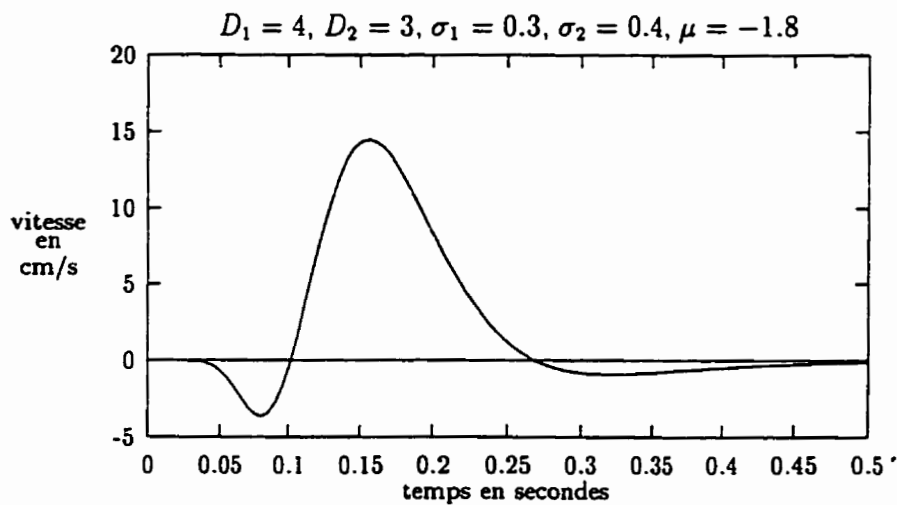


Figure 3.16: Deux passages par zéro dans le cas des μ égaux et σ différents.

ments dans le système neuromusculaire interviennent, les paramètres qui le caractérise peuvent s'adapter mutuellement entre eux pour compenser l'effet de variation.

Le modèle vectoriel a été principalement développé dans le cadre de mouvements rapides sur des cibles. Une signature est un tracé complexe et on peut supposer que de tels tracés sont composés par la génération d'une suite de traits simples. En voulant donner une représentation des signatures manuscrites basés sur le modèle delta lognormal vectoriel, cette thèse va contribuer à généraliser la théorie de R. Plamondon. Donc, l'objectif maintenant est de transposer la génération de traits simples à celle de tracés complexes que sont les signatures. Pour cela, le chapitre suivant va aborder la représentation des signatures basée sur le modèle delta lognormal vectoriel.

Chapitre 4

REPRÉSENTATION DES SIGNATURES

Après avoir présenté le modèle vectoriel dans le chapitre 2 et la richesse des courbes sous-jacentes dans le chapitre 3, ce chapitre aborde la représentation des signatures à partir du modèle delta lognormal vectoriel. Dans un premier temps, la synthèse de tracés manuscrits simples ou complexes va être présentée en introduisant quelques notions et équations de bases. Ensuite, ce chapitre traitera spécifiquement des différents éléments qui ont conduit qualitativement à la représentation des signatures: l'originalité principale de cette thèse.

Suite à l'énoncé de la représentation des signatures, les avantages de celle-ci seront montrées ainsi que les implications de la variation de la précision du mouvement sur l'image de la signature. Dans sa globalité, ce chapitre vise à clairement illustrer ce qu'est le geste de signer et ceci grâce au modèle delta lognormal vectoriel. .

4.1 Synthèse de tracés manuscrits

Pour réaliser la synthèse de tracés manuscrits, une distinction a été faite entre les traits courbes et droits. Une équation différente sera utilisée pour la génération de

chacun des deux types de trait. Même si un trait droit peut être considéré comme un trait courbe de rayon infini, il est plus facile d'utiliser une représentation spécifique pour sa mise en oeuvre logicielle. Les deux sections suivantes donnent les équations utilisées dans chacun des cas. Ensuite, avec la génération de plusieurs traits courbes et droits on montrera comment il est possible d'obtenir un tracé synthétique complexe — tel qu'une signature — par leur sommation vectorielle.

4.1.1 Trait courbe

Pour montrer comment construire un trait courbe, il faut partir de l'équation (4.1) qui donne la position de la pointe de la plume à un instant donné par rapport au centre d'un cercle (voir figure 4.1).

$$\vec{r} = (\rho \cos \varphi + x_c) \vec{i} + (\rho \sin \varphi + y_c) \vec{j} \quad (4.1)$$

Ensuite, l'équation (4.2) donne le vecteur vitesse de la pointe de la plume. Elle est obtenue par dérivation par rapport au temps du vecteur \vec{r} (pour plus de détails voir l'annexe C page 198).

$$\vec{v}_\sigma = \rho \dot{\varphi} (-\sin \varphi \vec{i} + \cos \varphi \vec{j}) \quad (4.2)$$

Le module du vecteur vitesse \vec{v}_σ est donné par l'équation (4.3). Si la courbure c est utilisée au lieu du rayon du cercle ($c = 1/\rho$), alors on peut écrire la relation (4.4) à partir de l'équation (4.3). La relation (4.4) définit la vitesse angulaire v_θ du modèle delta lognormal vectoriel.

$$v_\sigma = \rho \dot{\varphi} \quad (4.3)$$

$$\dot{\varphi} = cv_\sigma = v_\theta \quad (4.4)$$

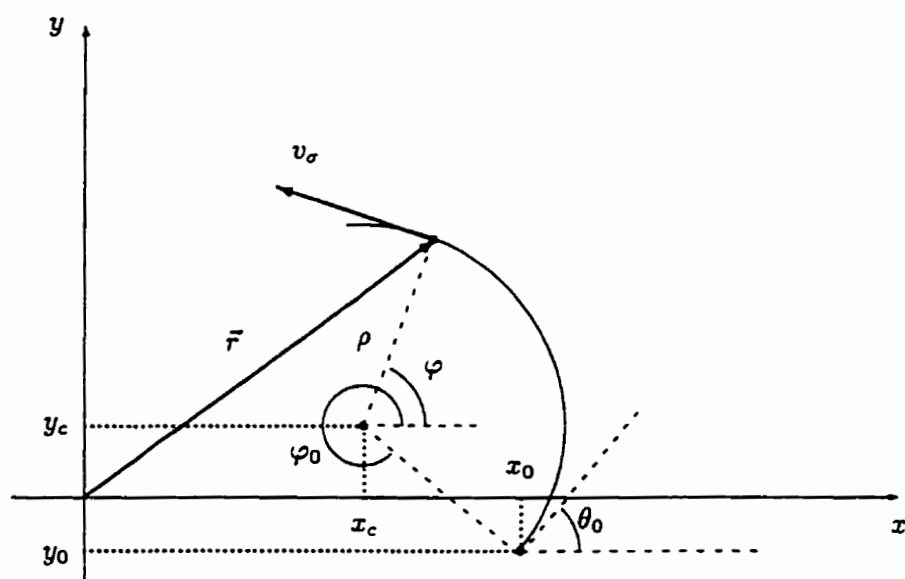


Figure 4.1: Position de la pointe de la plume pour un trait courbe

Selon le modèle delta lognormal vectoriel, un trait est caractérisé par une courbure constante C_0 , une direction initiale θ_0 et un profil de vitesse décrit par une équation delta lognormale. À partir de ces trois caractéristiques du trait, il est possible par intégration, à une constante¹ près, de retrouver la valeur de φ à un instant donné. Ceci permet de calculer la position de la plume à cet instant en reportant le résultat de l'intégrale dans la relation (4.1). L'intégrale de $\dot{\varphi}$ est calculée à partir de la relation (4.6).

$$\varphi = \int_{t_0}^t \dot{\varphi} dt = \int_{t_0}^t C_0 v_\sigma dt \quad (4.5)$$

$$\varphi = C_0 \int_{t_0}^t v_\sigma dt \quad (4.6)$$

Après intégration de (4.6), la valeur de φ est non signée puisque v_σ est un module et que la courbure obtenue à partir de la valeur du rayon du cercle est dans notre cas également non signée. Donc, il est impossible de savoir dans quel sens s'est effectué le déplacement de la plume. Par conséquent, la courbure initiale C_0 sera utilisée par convention pour indiquer le sens de rotation du trait. Si la courbure est positive le mouvement s'effectuera dans le sens trigonométrique (ou anti-horaire), par contre si elle est négative le mouvement s'effectuera dans le sens trigonométrique inverse (horaire).

La formule de reconstruction pour un trait courbe sera prise en tenant compte de la coordonnée du centre du cercle correspondant au trait. Ainsi pour reconstruire les coordonnées du trait courbe, on a la formule suivante:

$$\begin{cases} x(t) = \rho \cos(C_0 \int_{t_0}^t v_\sigma dt + \varphi_0) + x_c \\ y(t) = \rho \sin(C_0 \int_{t_0}^t v_\sigma dt + \varphi_0) + y_c \end{cases} \quad (4.7)$$

Les coordonnées du centre du cercle peuvent être exprimées en fonction des co-

¹la constante d'intégration est déterminée à partir des conditions initiales du trait.

ordonnées du point de départ du trait courbe (x_0, y_0) et de l'angle φ_0^2 associé à la position du point initial du tracé dans un repère cartésien:

$$\begin{cases} x_c = x_0 - \rho \cos \varphi_0 \\ y_c = y_0 - \rho \sin \varphi_0 \end{cases} \quad (4.8)$$

Par conséquent la formule complète de reconstruction d'un trait courbe — connaissant C_0 , φ_0 et la cinématique du trait avec v_σ décrit par une équation delta lognormale — est donnée par la relation (4.9).

$$\begin{cases} x(t) = \rho \cos (C_0 \int_0^t v_\sigma dt + \varphi_0) + x_0 - \rho \cos \varphi_0 \\ y(t) = \rho \sin (C_0 \int_0^t v_\sigma dt + \varphi_0) + y_0 - \rho \sin \varphi_0 \end{cases} \quad (4.9)$$

Enfin, comme la trajectoire est un cercle, alors φ_0 , l'angle associé à la position du point initial, et θ_0 la direction du mouvement de la plume, ont une différence en valeur absolue de $\pi/2$. Donc, si l'on connaît la valeur de θ_0 (ce qui est le cas avec le modèle), on peut déduire la valeur de φ_0 utilisée dans l'équation (4.9).

À partir de la formule de reconstruction donnée par (4.9), il est maintenant possible de générer un trait courbe si l'on connaît l'angle initial θ_0 , la courbure initiale C_0 , les coordonnées initiales du trait $P_0 = (x_0, y_0)$ et les caractéristiques cinématiques du trait (les paramètres de la courbe delta lognormale). La figure 4.2 donne un exemple de génération d'un trait courbe. Les losanges correspondent à des points d'échantillonnage ($f_e = 20$ Hz). Ceux ci permettent de visualiser partiellement la cinématique du trait courbe.

4.1.2 Trait droit

Le trait droit peut être considéré comme un trait courbe de rayon infini. Mais comme indiqué précédemment, celui-ci va plutôt être traité comme un cas particulier

² φ_0 ne correspond pas à la direction initiale de la trajectoire courbe du trait et ne doit pas être confondu avec le paramètre θ_0 du modèle delta lognormal vectoriel.

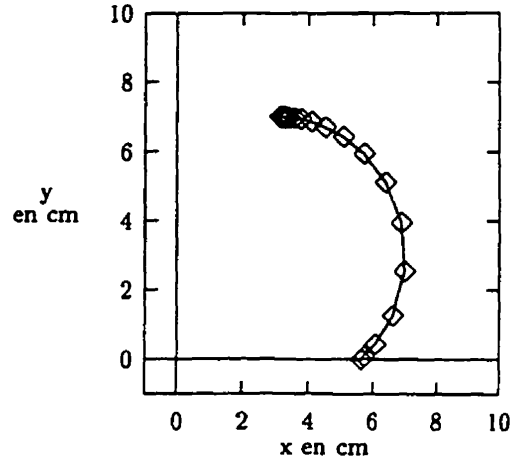


Figure 4.2: Trait courbe:

$\theta_0 = 0.72 \text{ rad}$, $C_0 = 0.25 \text{ cm}^{-1}$, $x_0 = 5.64 \text{ cm}$, $y_0 = 0 \text{ cm}$, $t_0 = 0 \text{ s}$,
 $D_1 = 9.67 \text{ cm}$, $\mu_1 = -1.0$, $\sigma_1 = 0.4$, $D_2 = 0.40 \text{ cm}$, $\mu_2 = -0.5$, $\sigma_2 = 0.3$

et va avoir sa propre relation pour le calcul de sa trajectoire.

Le trait droit peut s'exprimer par le vecteur \vec{r} en faisant intervenir les coordonnées du point d'origine (x_0, y_0) et sa direction initiale θ_0 (voir figure 4.3). Dans ces conditions, le vecteur \vec{r} peut s'écrire de la manière suivante:

$$\vec{r} = (x_0 + \rho \cos \theta_0) \vec{i} + (y_0 + \rho \sin \theta_0) \vec{j} \quad (4.10)$$

où contrairement au cas précédent, ρ varie en fonction du temps.

Par dérivation par rapport au temps, on obtient le vecteur vitesse \vec{v}_σ exprimé par la relation (4.11), où $\dot{\rho} = d\rho/dt$.

$$\vec{v}_\sigma = \dot{\rho} \cos \theta_0 \vec{i} + \dot{\rho} \sin \theta_0 \vec{j} \quad (4.11)$$

Par conséquent le module du vecteur vitesse \vec{v}_σ se résume simplement par $v_\sigma = \dot{\rho}$, où $\dot{\rho}$ suit une équation delta lognormal. Donc en intégrant v_σ on obtient à une

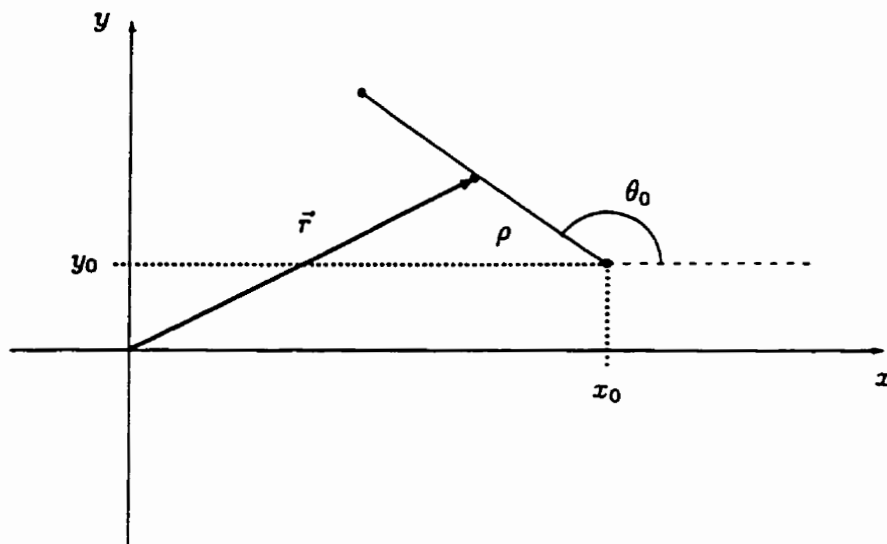


Figure 4.3: Position de la pointe de la plume pour un trait droit

constante près la valeur de $\rho(t)$ qui, une fois remplacée dans la relation (4.10), permet de calculer les coordonnées du trait par la relation (4.12).

$$\begin{cases} x(t) = (\int_{t_0}^t v_\sigma dt + \rho_0) \cos \theta_0 + x_0 \\ y(t) = (\int_{t_0}^t v_\sigma dt + \rho_0) \sin \theta_0 + y_0 \end{cases} \quad (4.12)$$

La valeur de la constante d'intégration est déterminée à partir de la position initiale de la pointe du crayon au début du tracé. Ainsi la valeur de ρ_0 est donnée par la relation (4.13).

$$\rho_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \quad (4.13)$$

La figure 4.4 donne un exemple pour la génération d'un trait droit à l'aide de la relation (4.12). Les losanges correspondent aux points d'échantillonnage ($f_e = 20$ hz).

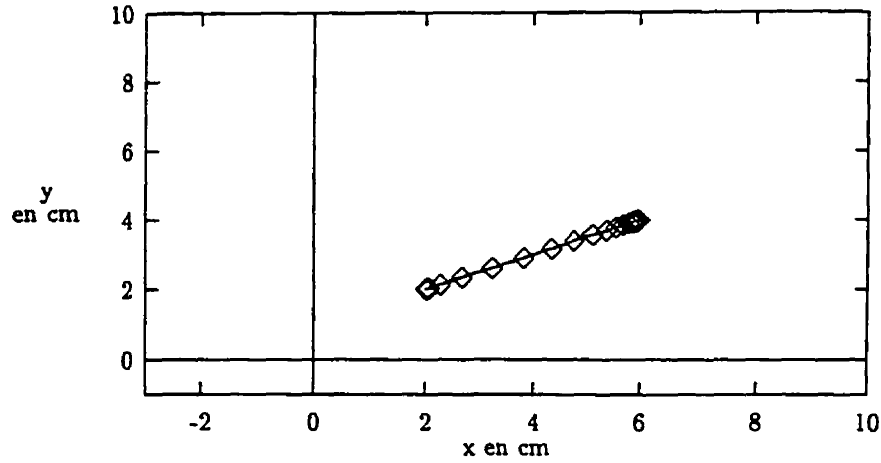


Figure 4.4: Trait droit:

$\theta_0 = 0.46 \text{ rad}$, $C_0 = 0.0 \text{ cm}^{-1}$, $x_0 = 2 \text{ cm}$, $y_0 = 2 \text{ cm}$, $t_0 = 0 \text{ s}$,
 $D_1 = 4.47 \text{ cm}$, $\mu_1 = -1.0$, $\sigma_1 = 0.4$, $D_2 = 0.20 \text{ cm}$, $\mu_2 = -0.5$, $\sigma_2 = 0.3$

4.1.3 Génération d'un tracé complexe

Par sommation vectorielle de traits droits et courbes, il est possible d'obtenir un tracé complexe proche de celui obtenu par l'action de signer. Si P désigne un point du tracé se déplaçant le long de la courbe résultante et, si \vec{P} désigne le vecteur qui lui est associé, alors la trajectoire d'un tracé complexe composé de n traits est décrite par l'équation (4.14).

$$\vec{P}(t) = \sum_{i=1}^n \vec{r}_i(t) \quad (4.14)$$

où les coordonnées $x_i(t)$ et $y_i(t)$ des vecteurs $\vec{r}_i(t)$ sont données par les équations (4.9) et (4.12) selon le cas. La figure 4.5 donne un exemple de signature synthétique reconstruite à partir de traits droits et courbes. Les paramètres des différents traits sont donnés dans le tableau 4.1.

Certains paramètres de cette pseudo- signature, tels que la courbure et l'angle ini-

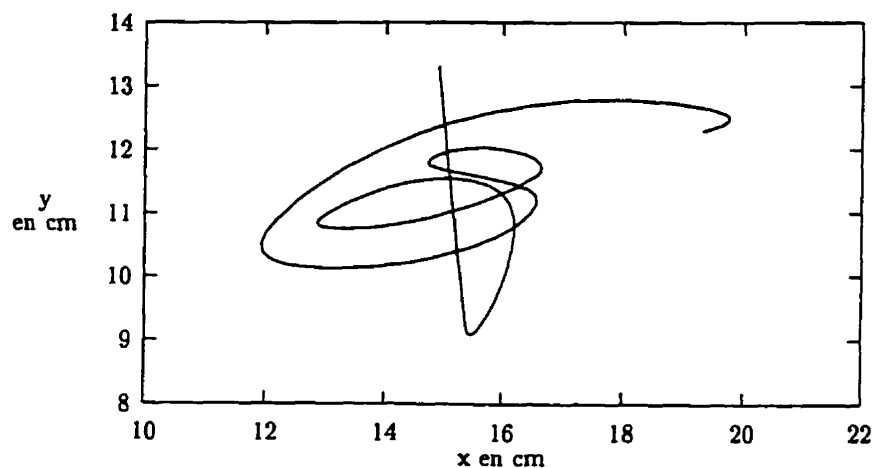


Figure 4.5: Un tracé complexe.

Tableau 4.1: Paramètres du tracé complexe de la figure 4.5

t_o	D_1	μ_1	σ_1	D_2	μ_2	σ_2	θ_0	C_0
0.00	4.800	-1.25	0.2	0.480	-0.75	0.5	-1.4600	0.0000
0.24	3.272	-1.56	0.2	0.320	-1.06	0.5	0.9420	0.2222
0.34	4.078	-1.56	0.2	0.400	-1.06	0.5	3.0980	0.1667
0.48	4.770	-1.52	0.2	0.470	-1.02	0.5	-0.0440	0.1250
0.66	2.787	-1.84	0.2	0.270	-1.34	0.5	2.7580	0.3125
0.68	4.000	-1.30	0.2	0.400	-0.80	0.5	-0.1400	0.0000
0.80	7.547	-1.43	0.2	0.750	-0.93	0.5	3.5950	-0.0910
0.91	9.900	-1.24	0.2	0.990	-0.74	0.5	0.7160	-0.1000
1.10	1.000	-1.24	0.2	0.100	-0.74	0.5	3.5000	-0.1000

tial du tableau 4.1 ont été déterminés directement à partir de l'image de la signature originale³ avec une règle, un compas et un rapporteur d'angle, en considérant la signature composée de portions de cercles et de droites. L'intersection de deux portions de cercles ou de droites pour des traits adjacents, permet de donner la position approximative des cibles virtuelles (voir chapitre 2). La distance entre deux cibles virtuelles le long de la trajectoire courbe du cercle (ou de la droite), donne une valeur D liée aux paramètres D_1 et D_2 du modèle delta lognormal vectoriel ($D = D_1 - D_2$). En fixant ensuite arbitrairement les paramètres neuromusculaires (μ_i, σ_i), il devient alors possible de reconstruire une pseudo- signature avec une statique proche de l'originale.

Ainsi, la figure 4.5 montre que la statique d'une signature peut être reconstruite avec de bons résultats juste par l'analyse de son image. En partant de cette constatation, un logiciel d'extraction de la courbure des traits (C_0) et de la position des cibles virtuelles sur les images des signatures a été développé. Ces informations permettent ensuite de déterminer les valeurs des angles initiaux (θ_0) et les distances à parcourir (D) pour chaque trait. La valeur D représente l'intégrale de la courbe delta lognormale et correspond à $D_1 - D_2$.

Donc, l'extraction de la représentation des signatures à partir de spécimens originaux va être abordée en deux étapes. Dans la première, l'information statique est déduite de la signature: C_0 , θ_0 et D . Dans la deuxième l'information statique déterminée précédemment est utilisée pour extraire les derniers paramètres liés aux caractéristiques cinématiques du signal: les μ et σ .

Cette décomposition en deux étapes a été envisagée car elle peut être mise à profit dans le domaine de la vérification dynamique de signatures. Deux aspects peuvent être distingués pendant le processus de vérification de signatures:

- la vérification de l'image;
- la vérification de la dynamique.

³la signature originale est présentée en annexe page 202.

Ainsi, un traitement en deux étapes du processus de représentation des signatures permettrait de faire un premier niveau de vérification sur l'image de la signature, à partir de l'extraction des caractéristiques statiques. Puis, suite à une acceptation de la statique, la vérification pourrait être raffinée par l'extraction des caractéristiques dynamiques. L'extraction de la statique étant plus rapide, cela éviterait de perdre du temps sur la vérification dynamique si celle-ci n'est pas nécessaire (refus au premier niveau).

Les sections qui suivent vont aborder la problématique de l'extraction des caractéristiques statiques et dynamiques d'une signature réelle. C'est à partir de ces extractions que l'on pourra parvenir à la représentation des signatures proposée dans cette thèse.

En vérification de signatures, le terme "*statique*" désigne l'image de la signature détachée de toute notion de temps. Son allèle est la "*dynamique*" dans laquelle intervient le temps. Dans la suite de cette thèse le terme "*dynamique*", lorsqu'il sera utilisé, prendra la sémantique du domaine de la vérification de signatures. En réalité la *dynamique* correspond dans notre cas à la cinématique de la signature.

4.2 Extraction de la statique

4.2.1 Avant-propos

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2 avec la description du modèle vectoriel, les cibles virtuelles constituent un concept important. Celles-ci vont être primordiales dans le cas du traitement des signatures tel qu'envisagé. Ainsi, les cibles virtuelles peuvent être considérées comme des points fixes sur lesquelles s'appuie la construction d'une signature. Elles doivent faire partie de la représentation à haut niveau de la signature qui est probablement unique.

Or, on constate — et il est très facile de le vérifier pour chacun d'entre nous — que l'on ne produit jamais deux fois la même signature. Il existe des variations légères

ou grandes d'une signature à l'autre. D'ailleurs, en vérification de signatures on a coutume de dire que si 2 signatures sont rigoureusement identiques, l'une d'entre elle est un faux!

Comment à partir d'une représentation haut niveau de la signature, probablement unique, peut-il y avoir une variation dans la production de celle-ci? Ceci peut s'expliquer par les paramètres cinématiques du mouvement liés aux effecteurs (réseaux de nerfs et de muscles qui produisent le mouvement) qui ont un état qui peut varier au cours du temps. De plus il y a la variabilité engendrée par le matériel utilisé comme: le changement du crayon (taille, poids, type) ou support pour la signature (lisse, rugueux).

Pour s'affranchir de cette variabilité des effecteurs, la détection des cibles virtuelles, va être exploitée. Celles-ci vont être considérées comme des points fixes sur lesquels s'appuie la reconstruction de la dynamique de la signature. Ceci nous amène à poser une première hypothèse.

hypothèse 1: Les positions des cibles virtuelles déduites des tracés d'une signature sont corrélées avec leur position dans leur représentation haut niveau.

Cette première hypothèse postule que les cibles virtuelles extraites doivent avoir une position fortement corrélée avec celle de la représentation haut niveau de la signature. Malheureusement, nous ne pouvons pas vérifier cette corrélation puisque nous ne disposons pas de cette information haut niveau.

Comme la variabilité des effecteurs déforme cette représentation haut niveau, ces déformations ne nous permettent pas de la retrouver exactement à partir de l'acquisition de l'image de la signature. Malgré tout, les caractéristiques dynamiques vont être extraites sur les profils de vitesse à partir de la description statique des signatures: les cibles virtuelles. L'ensemble des données ainsi obtenu servira à paramétriser cette signature, ce qui permettra d'en donner une représentation. De plus, par la suite nous verrons l'influence de la variation des effecteurs — simulée en

modifiant les paramètres neuromusculaires — sur l'image des signatures, grâce à la représentation ainsi obtenue.

4.2.2 Méthodologie

Le but de cette section est de montrer comment la statique d'un tracé manuscrit (son image) permet de donner approximativement les positions des cibles virtuelles. Les positions des cibles virtuelles vont nous permettre ensuite de déterminer l'angle initial θ_0 et la longueur d'un trait, deux paramètres intrinsèques du modèle vectoriel.

Pour l'extraction de la statique des signatures, une deuxième hypothèse a été posée.

hypothèse 2: Un tracé manuscrit complexe est formé d'une suite de traits dont la cinématique de chacun d'eux — les différentes courbes delta lognormales — se chevauche plus ou moins. Ce chevauchement n'est jamais complet.

Si le chevauchement était complet ou très important les courbes delta lognormales fusionneraient et il serait impossible d'observer une succession de cloches asymétriques sur les profils de vitesse curviligne comme c'est le cas normalement (voir figure 4.6).

C'est en exploitant cette constatation que la position dans le temps d'une cloche va être utilisée pour déterminer la courbure d'un trait. Sur une portion de cloche, compte tenu de l'hypothèse 2, il existe certainement des points pour lequel le trait n'est pas ou très peu influencé par les traits voisins. De plus, si les vitesses aux deux extrémités de la cloche sont proches de zéro, il est probable qu'il y ait très peu de chevauchement et la portion de tracé ainsi délimitée par la cloche est représentative de la courbure du trait constituant le tracé. Donc, en déterminant la position dans le temps des minima de vitesses délimitant une cloche, nous allons déterminer la courbure entre ces deux instants à partir du tracé manuscrit original. De plus, si les minima de vitesse s'éloignent de zéro, une fraction seulement de l'intervalle de

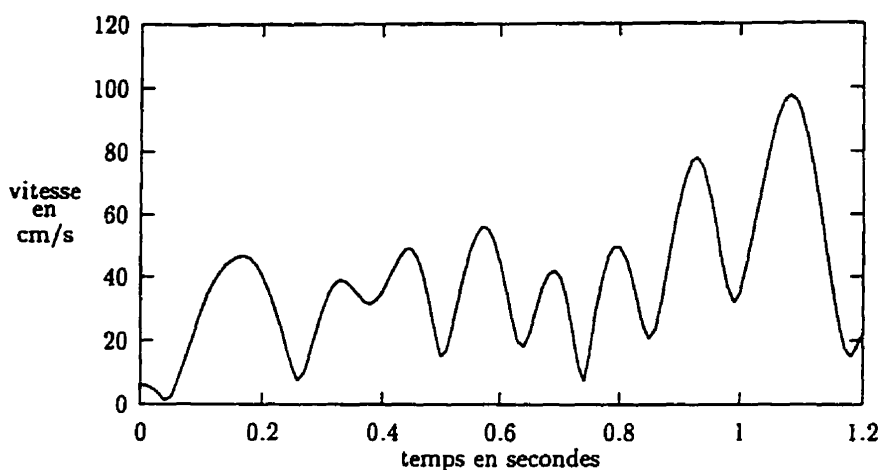


Figure 4.6: Profil de vitesse curviligne d'un tracé manuscrit complexe

temps sera utilisée afin de diminuer l'effet du chevauchement avec les traits voisins (précédent et suivant).

Sur la portion de tracé ainsi déterminée, une régression non linéaire permet de calculer le rayon du cercle — par conséquent la courbure C_0 — et la position du centre du cercle. Néanmoins, certaines portions de traits manuscrits pouvant être des traits droits, une régression linéaire a été ajoutée sur la même portion de tracé. Selon le résultat, en fonction du critère des moindres carrés, la portion de tracé est identifiée comme correspondant à la génération d'un trait droit ou d'un trait courbe.

Après avoir passé à travers tout le tracé manuscrit, on obtient une suite d'équation de cercles et de droites. À partir de ces équations, la position des cibles virtuelles est déterminée grâce à l'intersection de deux traits successifs dont on dispose des équations (droite ou cercle).

Trouver les points d'intersection à partir des équations est un problème relativement trivial. La difficulté réside plutôt dans le choix du bon point d'intersection correspondant à la cible virtuelle lorsqu'il en existe deux (exemple avec l'intersection

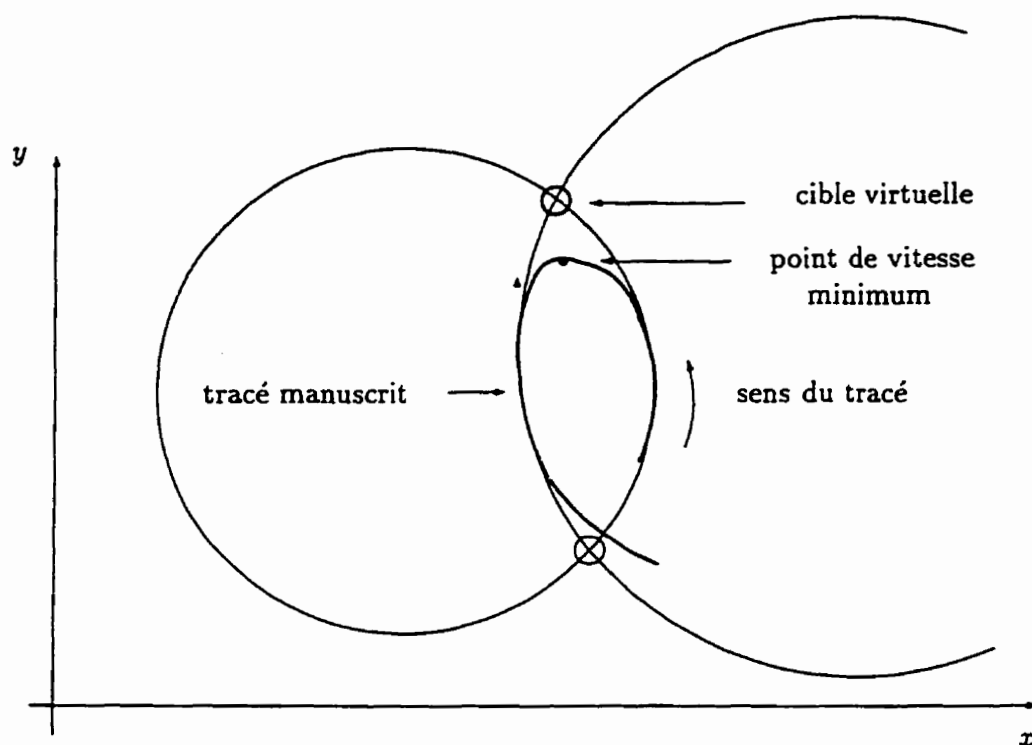


Figure 4.7: Détermination de la position de la cible virtuelle

de deux cercles ou du cercle et d'une droite). Pour régler ce problème il est nécessaire d'introduire une heuristique. Ainsi, on va retenir pour la cible virtuelle, le point d'intersection le plus proche, en terme de distance euclidienne, du point de coordonnées correspondant à la vitesse minimum entre les deux cloches. La figure 4.7 illustre cette heuristique.

Une fois les points d'intersection trouvés, on peut déterminer l'angle initial du trait θ_0 et la distance à parcourir D pour atteindre la prochaine cible. La distance D est liée aux paramètres D_1 et D_2 de la courbe delta lognormale par la relation (4.15). L'angle initial θ_0 est obtenu par l'angle de la tangente au début de chaque trait à la position de la cible virtuelle (voir figure 4.8).

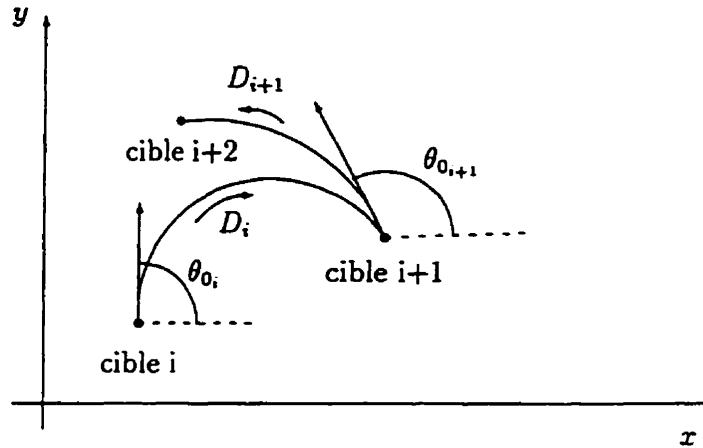


Figure 4.8: Statique d'une signature avec position des cibles virtuelles

$$D = D_1 - D_2 \quad (4.15)$$

La détermination de la position des cibles virtuelles, des courbures C_0 , des angles initiaux θ_0 et des distances D va constituer ce que nous allons appeler la représentation de la statique des signatures puisque ces paramètres sont liés à l'image de la signature. La section suivante donne deux exemples d'extraction de la statique obtenus par cette méthodologie.

4.2.3 Exemples d'extraction de la statique

Dans les exemples des figures 4.9 et 4.10, les losanges indiquent la position des cibles virtuelles et les tracés entre les cibles virtuelles correspondent aux portions de cercles ou de droites extraites par régression. Comme on peut le constater à partir de ces figures, la statique extraite est tout à fait représentative de la forme de la signature. Les signatures originales sont données en annexe page 202.

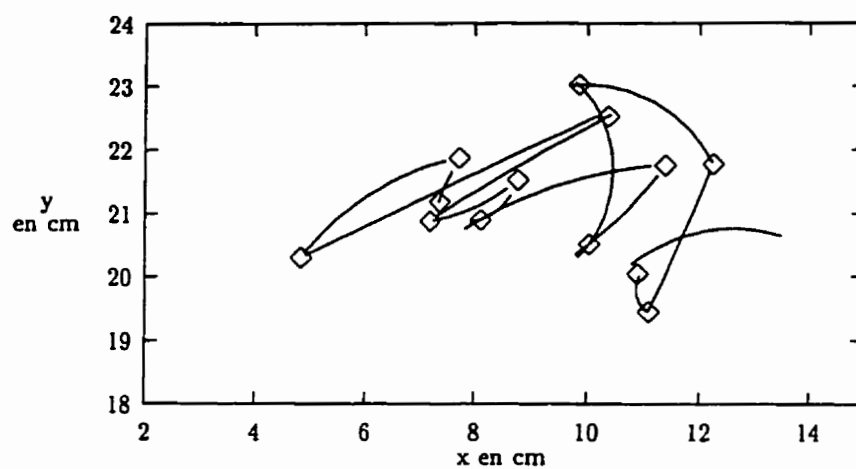


Figure 4.9: Cibles virtuelles du signataire 11.

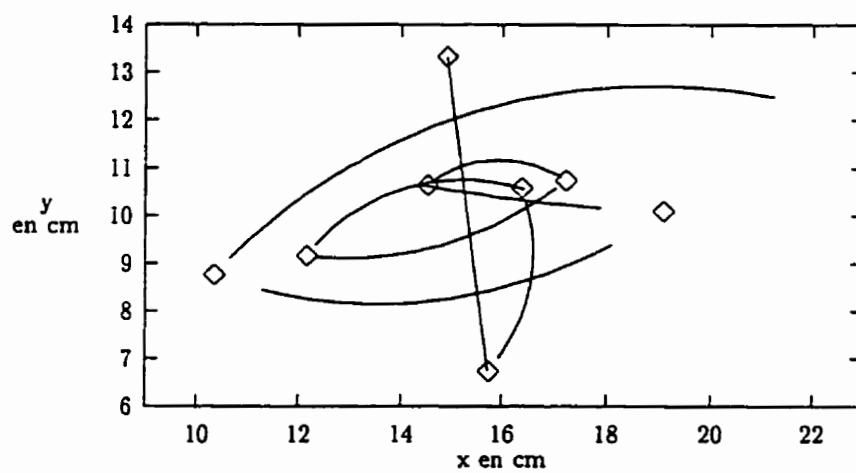


Figure 4.10: Cibles virtuelles du signataire 16.

Sur la figure 4.10, on peut constater qu'il manque un trait dans la portion en haut et à droite du graphique. Cette absence est due au fait que la dernière cloche du profil de vitesse n'est pas complète à cause d'une levée de crayon. Dans ce cas les caractéristiques du trait ne sont pas déterminées, car surtout pour la suite avec l'extraction de la cinématique nous avons besoin des profils en cloche complet (monté, passage par un maximum et descente). Ce phénomène peut se produire exclusivement en début et/ou en fin de tracé ce qui est sans conséquence sur la statique globale de la signature.

L'extraction de la statique d'une signature venant d'être décrite, l'étape suivante pour finaliser la représentation des signatures va consister à extraire la cinématique.

4.3 Extraction de la cinématique

L'extraction des caractéristiques cinématiques de la signature va se faire en utilisant sa statique: son image et les profils de vitesse. Compte tenu de l'équation du modèle: la courbe delta lognormale, la régression non linéaire va être utilisée pour extraire les paramètres . Cependant il y a une mise en garde qu'il est important de faire avant de décrire l'extraction de la cinématique d'une signature.

4.3.1 Mise en garde

La recherche des paramètres cinématiques va se faire grâce à la régression non linéaire. La régression non linéaire fait appel entre autre à la connaissance d'une solution initiale, puisque la technique consiste à faire une linéarisation autour de celle-ci, afin de calculer une correction à lui apporter. Ensuite par itérations successives, on continue le processus jusqu'à obtenir une convergence vers une solution qu'il n'est plus possible d'améliorer. Or, selon les conditions initiales choisies, il peut:

- ne pas y avoir convergence et dans ce cas il faut changer les conditions initiales ou;

- y avoir convergence, mais celle-ci ne garantit pas que la solution obtenue soit la meilleure globalement. Dans la majorité des cas, la solution correspond à un minimum local de la fonction de mérite.

De plus il existe des problèmes spécifiques liés aux méthodes de régression non linéaire qui sont:

- la surface de réponse est non-plane et non-infinie;
- la localisation du point le plus proche n'est pas unique;
- la correspondance du point le plus proche de la surface de réponse dans l'espace des paramètres n'est pas nécessairement unique.

Ceci fait toute la difficulté de la méthode car dans une topologie complexe de la surface de réponse, on peut obtenir différentes solutions, toutes minimisant un certain critère, qui correspondent à un minimum local et cela en fonction du choix des conditions initiales. En quelque sorte, dans un problème où le nombre de paramètres et de mesures est important, appliquer les méthodes de régression non linéaire est analogue à lâcher une bille à la surface d'un océan et à s'attendre que celle-ci finisse dans le creux le plus profond!

Donc, avec la régression non linéaire, on ne peut pas donner des conditions initiales au hasard, espérer que la méthode converge, puis vouloir expliquer la signification des paramètres. Ainsi, il est nécessaire de réfléchir sur les conditions initiales, faire des hypothèses, et ensuite en fonction des résultats obtenus, vérifier la cohérence des paramètres obtenus.

De plus dans cette thèse, on doit extraire en même temps, selon le critère des moindres carrés (méthode de Levenberg-Marquardt), un nombre de paramètres qui peut être supérieur à 100 (15 cloches \times 9 paramètres). Ceci nécessite d'inverser des matrices de l'ordre de 100x100 pour la résolution numérique d'équations, nécessaire dans les techniques de régression non linéaire. Or, selon la référence [92], il existe deux problèmes avec la résolution numérique d'équations:

- certaines équations sont proches d'être linéairement dépendantes, ce qui conduit à produire des matrices singulières. Dans le cas de matrices singulières, on ne peut pas trouver de solution. Le risque d'avoir des matrices singulières augmente avec le nombre d'équations. Donc plus on augmente le nombre de paramètres à estimer simultanément, plus on a de risques d'obtenir des matrices singulières.
- les erreurs d'arrondis qui s'accumulent peuvent donner une mauvaise solution. Ce problème est d'autant plus vrai lorsque le nombre des inconnues augmente. Numériquement les algorithmes convergent mais la solution n'est pas exacte. Cet état de fait a d'ailleurs été constaté dans des travaux internes réalisés au laboratoire Scribens [39]. À partir de différentes techniques de résolution d'équation, en modifiant la précision des calculs, on peut constater des différences dans les solutions proposées. L'algorithme donne une solution mais celle-ci n'est pas exacte.

Suite à ces mises en garde nous allons maintenant pouvoir aborder la régression dans le cadre de la recherche des paramètres cinématiques des signatures. Le but est de poser le problème spécifiquement pour les signatures qui sont des mouvements appris et stéréotypés. La section suivante vise à dégager des hypothèses ou principes de base qui vont guider le choix du modèle de la régression non linéaire et des conditions initiales pour cette régression.

4.3.2 Principes de bases pour la génération de signatures

Le modèle de génération de mouvements rapides proposé par R. Plamondon [77, 78] est très général et peut s'appliquer à différents types de mouvements rapides. Par exemple, dans les applications possibles, on compte les mouvements du poignet, des yeux, de la tête, etc [77]. Dans notre cas, nous désirons l'appliquer plus spécifiquement à la génération de signatures manuscrites. Compte tenu de l'aspect général de la théorie cinématique [72, 73], il est par conséquent nécessaire d'introduire des principes

de base pour l'appliquer spécifiquement à la génération de signatures manuscrites. Cette étape n'ayant jamais été réalisée auparavant, les pages qui suivent explorent le processus de génération de signatures manuscrites.

Ces principes sont d'autant plus nécessaires que les solutions, dans le cas de la régression non linéaire, ne sont pas uniques. Donc, selon les conditions initiales des méthodes itératives de régression non linéaires, on peut trouver plusieurs ensembles de paramètres tout à fait différents dont chacun minimise la somme des carrés des erreurs. La non-unicité des paramètres est difficilement conciliable avec la réalisation d'un système de vérification de signatures. Les principes de base visent ainsi à réduire l'éventail des paramètres possibles. Voici une présentation de ces différents principes de base que cette thèse propose.

principe 1: Les antagonistes sont négligeables.

$$D_1\Lambda(t_0, \mu_1, \sigma_1^2) \gg D_2\Lambda(t_0, \mu_2, \sigma_2^2) \quad (4.16)$$

$$v(t) \approx D_1\Lambda(t_0, \mu_1, \sigma_1^2) \quad (4.17)$$

Justification: La signature est un mouvement rapide programmé d'avance. Le mouvement résulte de l'action de deux systèmes neuromusculaires: agoniste et antagoniste. Le système neuromusculaire agoniste agit dans le sens du mouvement, tandis que l'antagoniste freine le mouvement. Pour réaliser un mouvement rapide, on peut considérer que l'action des antagonistes doit être faible puisqu'une forte action de leur part entraîne un ralentissement du mouvement. Pour argumenter ce choix, il est important aussi de citer l'ouvrage [32] page 1694.

“SYNERGISTES ET ANTAGONISTES: L'électromyogramme global d'un mouvement simple montre que dans de nombreux cas seul l'agoniste est actif. Ailleurs cependant, une mise en jeu simultanée de l'agoniste

et de muscles voisins peut être mise en évidence, la contraction de ceux-ci servant en particulier à immobiliser des articulations proches de celle qui effectue le mouvement lui-même. On peut les appeler "synergistes". Parfois même, on constate l'intervention des antagonistes. Leur mise en jeu peut simplement servir à freiner, en fin de course, le mouvement provoqué par les agonistes, bien que plus souvent, conformément à la règle de l'innervation réciproque, l'arrêt d'un mouvement soit uniquement en rapport avec une cessation d'activité de l'agoniste lui-même. Néanmoins, on observe dans certains cas des mouvements raidis, caractérisés par le fait que, durant toute leur durée, l'activité des agonistes accompagne celle des antagonistes."

Le fait de négliger les antagonistes, en considérant la relation 4.16, entraîne une diminution du nombre des paramètres cinématiques de 7 ($D_1, \mu_1, \sigma_1, D_2, \mu_2, \sigma_2, t_0$) à 4 ($D_1, \mu_1, \sigma_1, t_0$), soit près de la moitié. De plus, cette simplification permet d'obtenir une relation entre la position du maximum de vitesse t_m et les paramètres t_0, μ_1 et σ_1 . Cette relation est donnée par l'équation 4.18.

$$t_m = e^{\mu_1 - \sigma_1} + t_0 \quad (4.18)$$

Ainsi, en mesurant t_m à partir de la courbe de vitesse et en estimant μ_1 et σ_1 par une méthode graphique combinée à la régression non linéaire [23], on peut déduire une valeur pour t_0 à partir de l'équation 4.19.

$$t_0 = t_m - e^{\mu_1 - \sigma_1} \quad (4.19)$$

Cette façon de procéder permet de régler le problème de la décroissance de t_0 vers $-\infty$ qui a été observée pendant les itérations de la régression non linéaire. Cette décroissance peut s'expliquer par la relation qui existe entre t_0 et μ_1 (équation 4.19) présentée sur la figure 4.11. Ainsi, une petite augmentation de μ_1 entraîne une grande

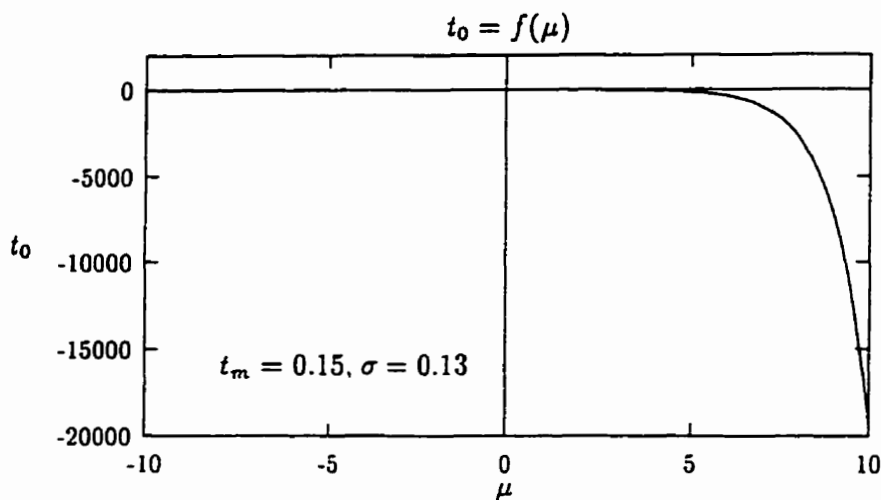


Figure 4.11: Dépendance de t_0 avec μ selon l'équation 4.19

décroissance de t_0 ceci afin de garder la même valeur de t_m .

Grâce à la relation 4.19, et l'approximation 4.17 nous sommes rendus à estimer, par régression non linéaire, seulement 3 paramètres (D_1, μ_1, σ_1).

Vers la fin du mouvement, il doit cependant exister un freinage. Dans le cas d'une signature, on peut envisager que le freinage, puisqu'il s'agit d'un mouvement fluide, est réalisé avec le début du mouvement du trait suivant. Ainsi, une signature étant une succession de mouvements dans des directions quasiment opposées, la réalisation d'un trait entraîne par ce fait même le freinage du mouvement précédent. En quelque sorte, ce sont les différents mouvements qui vont jouer le rôle d'antagoniste. D'ailleurs, dans l'article [27] la figure 1 (reproduite dans la figure 4.12) montre le diagramme temporel pour un mouvement perpendiculaire à la direction du mouvement pour l'écriture de la lettre "a" associé avec l'electromyogramme. Cette figure montre clairement la nature alternée de l'activité des paires d'antagonistes.

principe 2: l'influence d'un mouvement est restreinte dans le temps.

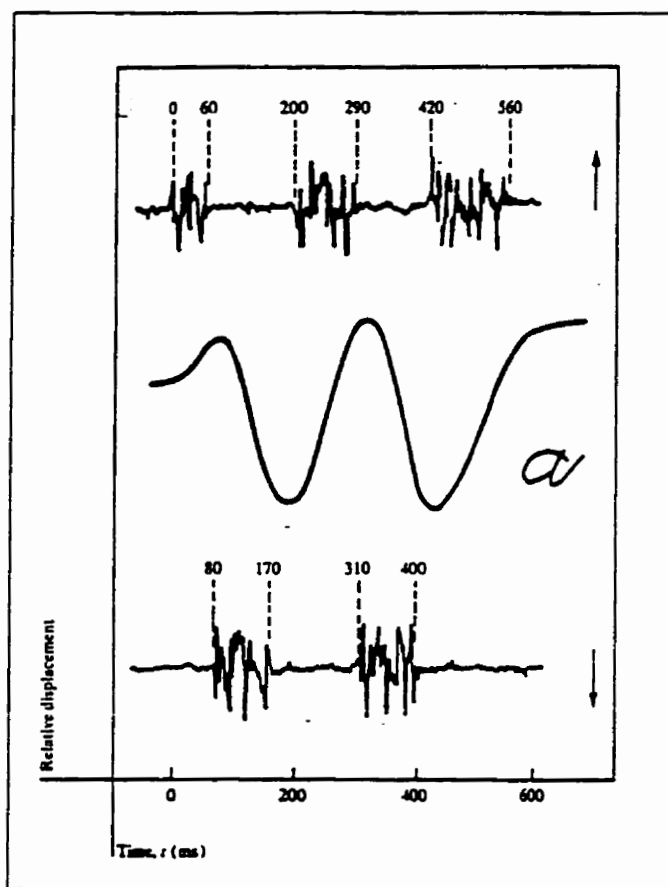


Figure 4.12: Activité d'une paires d'antagonistes (figure 1 de N. M. Herbst et C. N. Liu tirée de la référence [27])

Justification: Dans ce principe, on suppose qu'un mouvement ne perturbe pas ou peu la vitesse maximum du mouvement suivant. La vitesse étant de l'énergie ($E_c = 1/2mv^2$), si on veut que le système biomécanique soit efficace, il faut qu'il fasse perdre le moins d'énergie possible surtout au moment où un mouvement atteint sa vitesse maximum.

La justification de ce principe est également supportée par l'article de W. L. Nelson [52] traitant des "*principes physiques pour l'économie de mouvements habiles*" (Physical Principles for Economies of Skilled Movements). Dans cet article l'auteur argumente que les mouvements habiles (ou que l'on pourrait qualifier de stéréotypés) cherchent à satisfaire un objectif qui peut être décrit en termes tel que: *facilité, économie ou efficacité* en respectant un certain nombre de contraintes. Par exemple un violoniste, pour les mouvements de l'archet, devra respecter le tempo (contraintes de temps) avec l'objectif de faire de la "belle" musique.

Dans le cas de la signature, l'objectif est de se faire identifier, mais qu'elles sont les contraintes? Doit-on minimiser une distance, une durée ou un coût (ex: le coût énergétique)? La distance n'est pas un critère à minimiser dans le cas des signatures car selon l'espace qui lui est alloué le signataire va produire une signature plus ou moins grande. S'il minimisait la distance parcourue par la pointe du crayon, les signatures auraient toujours sensiblement la même taille.

Toujours dans l'article [52], par un modèle simple des mouvements habiles, on peut constater que les formes triangulaires, pour les profils de vitesses, sont caractéristiques de la contrainte de minimiser la durée. Cet objectif de durée peut être supporté par l'article de N. M. Herbst [27] où l'auteur mentionne le fait que la durée des signatures d'un même individu ne diffère pas plus de 10 ms les unes des autres.

Autre fait intéressant que l'on peut retirer de l'article [52], c'est que la minimisation d'une fonction coût entraîne de travailler près des limites du système. Ainsi, si l'on veut minimiser la durée on va produire de grandes accélérations proches de l'accélération maximum permise par le système. Travailler dans de telles conditions

ne semble pas raisonnable. Donc, des compromis vont se développer pour les mouvements stéréotypés pendant la phase d'apprentissage. Pour des mouvements répétitifs hautement appris comme la signature, il va donc y avoir un compromis qui va s'installer pour faire des mouvements plus faciles, plus économiques tout en minimisant la durée puisque c'est elle qui est responsable des profils caractéristiques et que la signature semble stable en durée.

Avec ce deuxième principe le nombre de paramètres ne diminue pas, mais on oblige les μ et σ à prendre des valeurs qui respectent ce principe. Celui-ci limite la variabilité de μ et σ ce qui va se traduire mathématiquement par une réduction du nombre de solutions possibles.

principe 3: Les cibles virtuelles sont atteintes avec une précision quasi infinie, c'est à dire une erreur relative pratiquement nulle.

Justification: Puisque les cibles virtuelles ne sont en général pas atteintes au cours d'un mouvement composé et fluide à cause du chevauchement des traits, on peut supposer que virtuellement, en l'absence de chevauchement, elles seraient atteintes avec une erreur ΔD nulle ou quasi nulle. C'est un peu ce qui justifie qu'elles soient des cibles virtuelles. Les cibles virtuelles sont des objectifs que l'on se fixe, et on peut faire l'hypothèse que celles-ci vont être atteintes avec une précision infinie ou très grande. Dans ce cas, compte tenu de la relation (4.20) de R. Plamondon (dans [78] page 312), si ΔD est nulle ou très faible, cela entraîne que $D_2 \approx 0$. Donc, ce troisième principe rejoint le premier en impliquant que l'action des antagonistes est faible ou quasiment nulle.

$$\left(\frac{D_2}{D_1}\right)_{max} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \left(\frac{\Delta D}{D}\right)_{max} \quad (4.20)$$

Donc, en conclusion, ces trois (3) principes de base vont permettre d'orienter le choix des paramètres du modèle pour la régression ainsi que celui des conditions initiales. L'application de ces principes de base est inévitable pour minimiser la

pluralité des paramètres engendrée par la régression non linéaire. Il faut absolument faire des hypothèses avant d'interpréter les paramètres et éviter le piège d'essayer de les interpréter en ayant pris des conditions initiales au hasard pour la régression. Dans ce cas, l'interprétation sera tout aussi hasardeuse.

4.3.3 Réalisation pratique

Compte tenu du but de ce chapitre qui consiste à proposer une représentation des signatures, les sections suivantes vont donner quelques approches qui ont été envisagées pour y parvenir. Ces différentes approches vont également permettre une mise en pratique des trois principes proposés.

4.3.3.1 Modèle linéaire

En premier pour la représentation des signatures, on peut se demander si la simplification extrême d'utiliser une sommation linéaire des profils de vitesse plutôt que vectorielle pourrait constituer une solution satisfaisante. Cette simplification aurait l'avantage d'alléger considérablement l'extraction des paramètres. Pour le vérifier, nous avons choisi une signature test donnée en annexe D page 202. Sur cette signature, la statique a déjà été extraite (voir dans la section précédente la figure 4.10). Maintenant l'extraction de sa cinématique va être présentée.

La cinématique est extraite en tenant compte des principes 1 et 3. Ceci nous conduit à un modèle pour la régression ayant une équation du type (3.20) ou (3.23) si on applique le principe 1 en toute rigueur: antagonistes nuls. Avec ce type d'équation on peut utiliser la méthode graphique de Wise [23, 24, 107]. Compte tenu que celle-ci fixe la valeur de σ en fonction des caractéristiques géométriques de la courbe, il n'est pas possible de garantir le respect du principe 2. Les paramètres extraits par cette méthode sont donnés dans le tableau 4.2. La figure 4.13 donne l'image de la signature reconstruite à partir de ces paramètres. Sur celle-ci, les pointillés indiquent la forme de la signature originale.

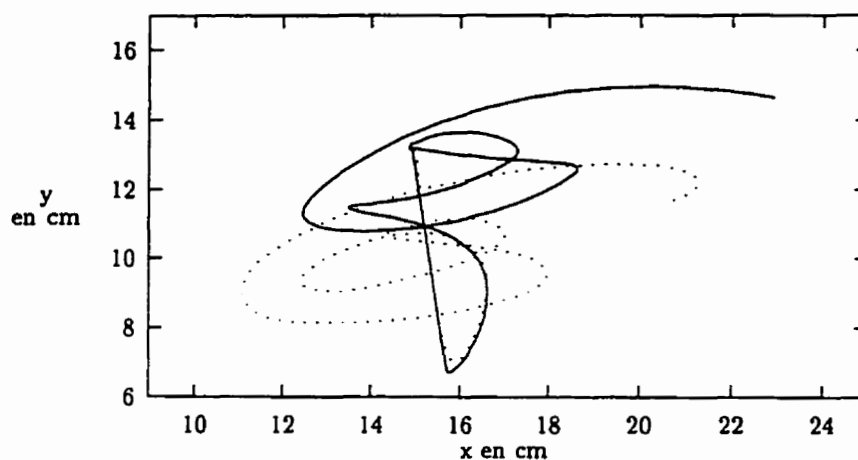


Figure 4.13: Reconstruction avec une sommation linéaire.

Tableau 4.2: Paramètres de la figure 4.13

t_o	D_1	μ_1	σ_1	D_2	μ_2	σ_2	θ_0	C_0
-1.25	6.863	0.34	0.040	0.0	0.34	0.040	-1.4463	0.00
0.25	6.324	-2.08	0.668	0.0	-2.08	0.668	0.8895	0.25
0.13	2.479	-1.17	0.100	0.0	-1.17	0.100	2.8399	0.26
0.16	4.953	-0.89	0.088	0.0	-0.89	0.088	-0.1332	0.15
-0.03	2.846	-0.33	0.037	0.0	-0.33	0.037	2.4925	0.47
0.66	4.445	-1.93	0.239	0.0	-1.93	0.239	-0.1915	0.03
0.54	7.914	-0.93	0.101	0.0	-0.93	0.101	-2.4551	-0.11
0.37	12.515	-0.34	0.068	0.0	-0.34	0.068	0.8652	-0.09

Comme on peut le constater sur cette première reconstruction de la signature, celle-ci ne respecte pas sa statique globale. Cependant, localement certaines portions du tracé ressemblent à la signature originale. Pour justifier ces déformations, on peut dire que le chevauchement des différents tracés qui s'enchaînent, affecte la statique de la signature à cause de l'absence de la sommation vectorielle. Donc, nous ne pouvons pas considérer que les paramètres cinématiques extraits en utilisant une sommation linéaire soient satisfaisants pour donner une représentation des signatures. De plus, dans les paramètres donnés dans le tableau 4.2, on constate que les t_0 sont incohérents puisque par exemples le cinquième trait est généré avant les traits 2, 3 et 4. Donc, il est nécessaire de considérer la sommation vectorielle pour espérer régler les incohérences statiques et cinématiques.

4.3.3.2 Modèle vectoriel: solution 1

Suite aux observations de la section précédente, le modèle vectoriel est appliqué en respectant toujours les principes 1 et 3. Dans cette première solution, les conditions initiales sont également données par la méthode graphique de Wise en incluant une ré-estimation du paramètre D , qui a normalement été obtenu à partir de la statique de la signature (voir section 4.2).

Dans cette première solution, on constate sur la figure 4.14 une amélioration dans la reconstruction de la statique de la signature. Maintenant, on observe une certaine ressemblance avec la signature originale donnée en pointillés. Les traits qui s'enchaînent respectent l'allure globale de la signature.

Malgré tout, on voit que localement la signature reconstruite a subi des déformations. Ces déformations sont surtout dues à la ré-estimation des paramètres D . Comme les distances parcourues entre les cibles virtuelles changent cela entraîne de légères déformations locales. Mais ce n'est pas le problème le plus grave dans le cadre d'un système de vérification de signatures, car la statique est proche de l'originale et, la signature reconstruite de la figure 4.14 pourrait passer pour un autre spécimen du

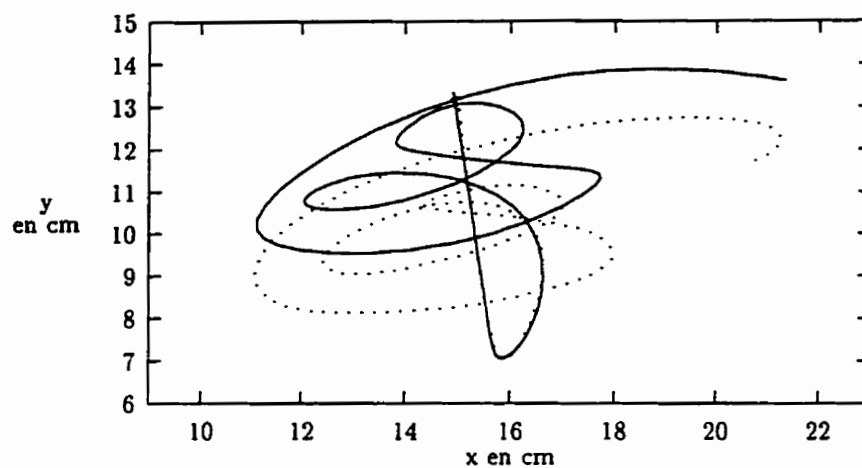


Figure 4.14: Reconstruction avec une sommation vectorielle: solution 1.

Tableau 4.3: Paramètres de la figure 4.14

t_o	D_1	μ_1	σ_1	D_2	μ_2	σ_2	θ_0	C_0
-1.25	6.838	0.35	0.039	0.0	0.35	0.039	-1.4463	0.00
0.16	5.919	-1.67	0.339	0.0	-1.67	0.339	0.8895	0.25
0.13	4.607	-1.15	0.126	0.0	-1.15	0.126	2.8399	0.26
0.15	6.265	-0.87	0.107	0.0	-0.87	0.107	-0.1332	0.15
-0.04	3.710	-0.33	0.046	0.0	-0.33	0.046	2.4925	0.47
0.64	4.715	-1.79	0.232	0.0	-1.79	0.232	-0.1915	0.03
0.54	8.597	-0.93	0.101	0.0	-0.93	0.101	-2.4551	-0.11
0.37	12.289	-0.34	0.068	0.0	-0.34	0.068	0.8652	-0.08

même signataire. Par contre, si l'on regarde le tableau 4.3, on constate la même incohérence avec les valeurs de t_0 . Des traits semblent avoir été générés avant d'autres et ne respectent pas l'aspect séquentiel de leur apparition dans le tracé de la signature. Ceci nous a conduit à changer la façon de procéder et à prendre une autre approche.

4.3.3.3 Modèle vectoriel: solution 2

Dans cette autre solution, le modèle vectoriel a été utilisé en prenant une solution initiale donnée par la méthode graphique de Wise et en conservant les valeurs de D obtenues avec la statique de la signature afin de respecter la position des cibles virtuelles à la reconstruction.

De nouveau, globalement la forme de la signature est conservée (voir figure 4.15). Comme nous utilisons les cibles virtuelles comme des points fixes, déterminées à partir de la signature originale, la somme vectorielle entraîne une conservation globale de la forme en produisant des images superposables. Par conséquent, si l'on s'éloigne du tracé original sur un des traits, selon l'importance du chevauchement des profils en cloches, la somme vectorielle garantie que sans chevauchement on serait passé par les cibles virtuelles données précédemment dans la figure 4.10. Cette fois-ci, c'est donc le chevauchement qui entraîne les écarts locaux des traits de la trajectoire originale. Malgré tout, on est sûr à la fin du tracé d'atteindre la dernière cible, puisque les distances entre les cibles virtuelles sont respectées. Les cibles virtuelles ont été ajouté sur la figure 4.15 pour témoigner de cet état de faits.

Mais de nouveau le problème vient de la cinématique données dans le tableau 4.4. Il demeure toujours une incohérence dans la succession des différents traits. Pour régler ce problème il est indispensable d'inclure le principe 2 qui permet de restreindre l'influence dans le temps d'un trait.

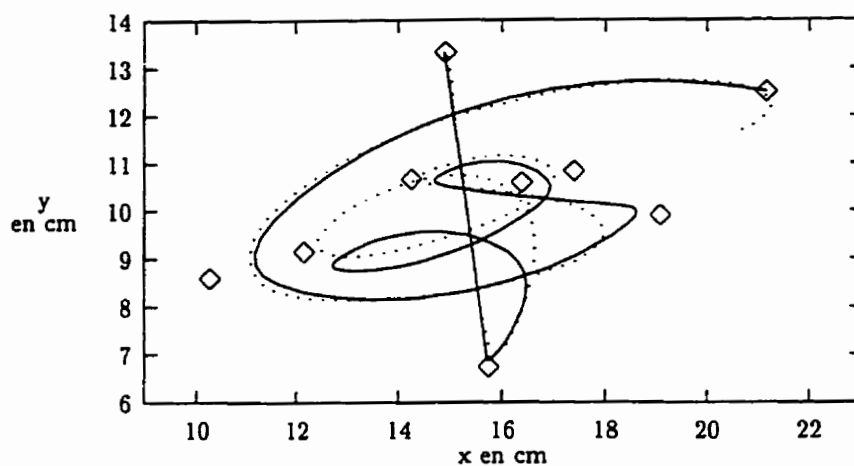


Figure 4.15: Reconstruction avec une sommation vectorielle: solution 2

Tableau 4.4: Paramètres de la figure 4.15

t_o	D_1	μ_1	σ_1	D_2	μ_2	σ_2	θ_0	C_0
-1.25	6.638	0.34	0.039	0.0	0.34	0.039	-1.4463	0.0000
0.25	4.087	-2.08	0.668	0.0	-2.08	0.668	0.8895	0.2530
0.12	4.756	-1.13	0.116	0.0	-1.13	0.116	2.8399	0.2634
0.15	5.466	-0.87	0.095	0.0	-0.87	0.095	-0.1332	0.1597
-0.05	2.910	-0.31	0.038	0.0	-0.31	0.038	2.4925	0.4747
0.64	4.598	-1.85	0.237	0.0	-1.85	0.237	-0.1915	0.0336
0.54	9.280	-0.93	0.101	0.0	-0.93	0.101	-2.4551	-0.1148
0.37	12.062	-0.34	0.068	0.0	-0.34	0.068	0.8652	-0.0887

4.3.3.4 Modèle vectoriel: solution 3

Dans cette solution, le modèle vectoriel a été utilisé avec des conditions initiales respectant les trois principes de base et en conservant les valeurs de D obtenues avec la statique de la signature à partir des cibles virtuelles. Comme les valeurs de D sont conservées et que les conditions initiales correspondent à celle d'une courbe lognormale simple — c'est-à-dire sans antagonistes —, le résultat final après régression correspondra aussi à des courbes lognormales simples.

Les valeurs du paramètre σ des courbes delta lognormales vont être choisies pour respecter le principe 2. Comme les antagonistes sont négligés à cause des principes 1 et 3, c'est la valeur de σ_1 de l'agonistes qui va être fixée. Dans le chapitre 3, on a vu que σ est un paramètre de forme et que plus sa valeur est élevée, plus la queue de la lognormale est importante. Donc pour limiter l'influence d'un trait sur le suivant, il faut que la valeur de σ soit faible. Sa valeur initiale sera fixée à 0.2 pour la régression non linéaire.

Le paramètre μ pouvant entraîner, comme nous l'avons vu aussi au chapitre 3 un étalement temporel, nous décidons de fixer sa valeur à -1.84 , en s'appuyant sur le profil donné dans la figure 3.4. Ainsi, avec $\sigma = 0.2$ et $\mu = -1.84$, on constate que le pic dure environ 100 ms ce qui est compatible avec les observations faites sur les profils de vitesse de différentes signatures.

Donc, pour chacune des cloches, nous donnerons individuellement des conditions initiales identiques qui seront $\mu = -1.84$ et $\sigma = 0.2$. Chacune des cloches fera l'objet d'une régression non linéaire avec ces conditions initiales en partant de la première cloche (début du tracé) jusqu'à la dernière cloche (fin du tracé). Chaque cloche va déterminer individuellement une variation des paramètres μ et σ obtenue par correction de la valeur initiale (principe de la régression non linéaire).

En partant du début du tracé, chaque cloche ainsi estimée sera retranchée du profil de vitesse. Après ce premier passage, une ré-estimation globale des paramètres est réalisée pour réajuster l'estimation locale des paramètres données comme condition

initiale de cette nouvelle estimation.

À partir de ce protocole, on obtient la signature de la figure 4.16. Cette signature est superposable avec la signature originale dont les points d'acquisition sont indiqués sur cette même figure par des losanges. Outre un aspect anguleux des deux traits finaux dû à un manque de chevauchement, la signature synthétique (dont les paramètres sont donnés dans le tableau 4.5) respecte la statique de la signature. La reconstruction de la cinématique est présentée sur la figure 4.17. Les losanges indiquent les points d'échantillonnage du signal original et le tracé continu le signal synthétique reconstruit.

Sur le graphique de la figure 4.17, les différences d'amplitude de certains pics entre l'original et le reconstruit sont dues à l'estimation des paramètres D_i obtenue à partir de la statique de la signature. La statique et la cinématique étant évaluées séparément, nous ne pouvons pas retrouver la cinématique exacte de la signature, on peut uniquement trouver une cinématique en rapport avec la statique estimée et les profils de vitesse réelle de la signature.

Comme on peut le constater avec le tableau 4.5, cette fois-ci, les paramètres cinématiques sont cohérents. L'aspect séquentiel des traits est conservé. Donc avec ce troisième cas, la statique et la cinématique estimées permettent de reproduire des signatures synthétiques qui s'apparentent à différents spécimens d'un même signataire. On se rapproche de notre but qui consiste à donner une représentation des signatures.

Puisque l'on peut maintenant reproduire la dynamique et la statique d'une signature grâce aux principes de base — ceci pour un individu — on peut s'interroger sur l'influence des conditions initiales. Ainsi, l'influence du choix de la valeur initiale des paramètres μ et σ a été étudiée sur une banque de 220 signatures. Dans cette banque, 22 individus ont produit chacun 10 signatures; celle-ci sera décrite plus en détail dans le chapitre suivant.

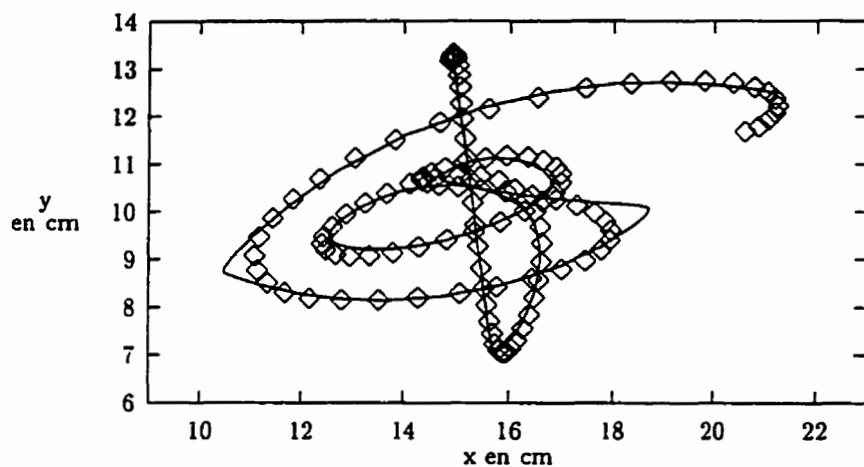


Figure 4.16: Reconstruction avec une sommation vectorielle: solution 3

Tableau 4.5: Paramètres de la figure 4.16

t_o	D_1	μ_1	σ_1	D_2	μ_2	σ_2	θ_0	C_0
-0.03	6.638	-1.61	0.247	0.0	-1.61	0.247	-1.4463	0.0000
0.13	4.087	-1.53	0.195	0.0	-1.53	0.195	0.8895	0.2530
0.24	4.756	-1.57	0.187	0.0	-1.57	0.187	2.8399	0.2634
0.37	5.466	-1.60	0.200	0.0	-1.60	0.200	-0.1332	0.1597
0.49	2.910	-1.63	0.145	0.0	-1.63	0.145	2.4925	0.4747
0.64	4.598	-1.81	0.225	0.0	-1.81	0.225	-0.1915	0.0336
0.77	9.280	-1.84	0.200	0.0	-1.84	0.200	-2.4551	-0.1148
0.93	12.062	-1.84	0.200	0.0	-1.84	0.200	0.8652	-0.0887

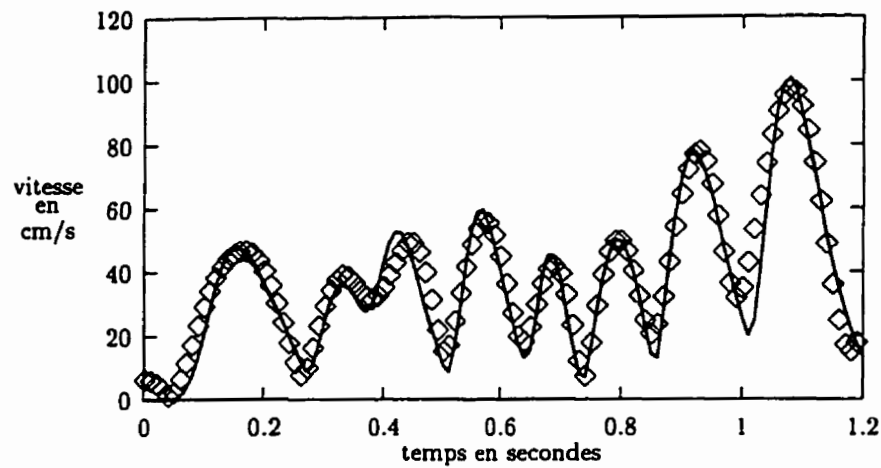


Figure 4.17: Comparaison de la vitesse curviligne entre l'originale et le synthétique

4.3.4 Influence du choix des conditions initiales

Pour étudier l'influence du choix des conditions initiales, nous avons considéré l'erreur quadratique moyenne (*EQM*) entre les profils de vitesse original et synthétique en fonction de différentes valeurs de μ et σ .

La figure 4.18 présente les résultats obtenus sur une banque de 220 signatures provenant de 22 individus (10 signatures par individu). Sur celle-ci, on peut constater qu'une valeur de σ se distingue dans le choix des conditions initiales. Ainsi, quelle que soit la valeur de μ la courbe présente un minimum pour $\sigma = 0.2$. Par contre, pour une valeur donnée de σ , aucune valeur de μ semblent se démarquer des autres pour son choix dans les conditions initiales.

4.3.5 Ajustement de la représentation des signatures

À partir des sections précédentes, on peut constater que l'on est arrivé qualitativement à une représentation des signatures qui permet de:

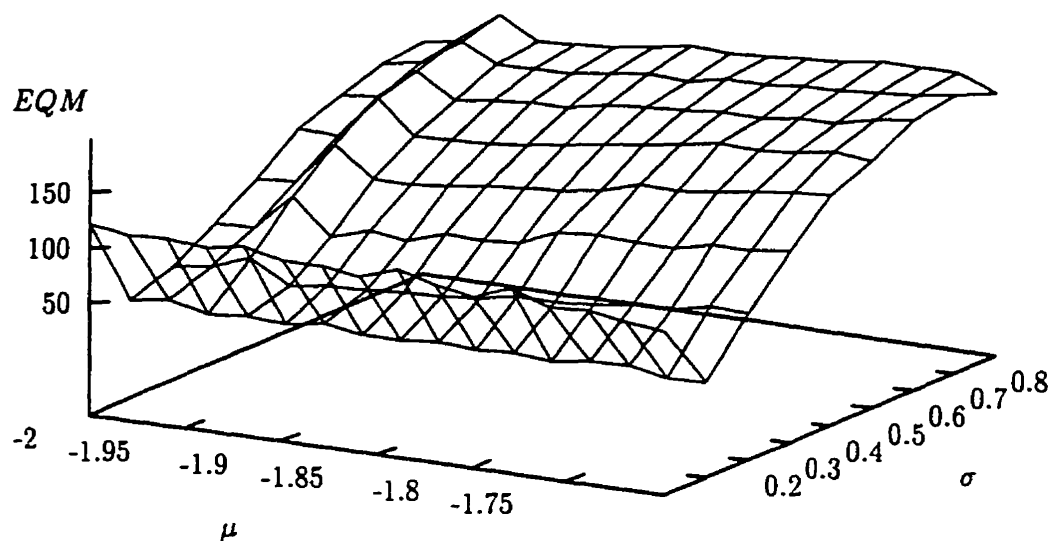


Figure 4.18: EQM en fonction de μ et σ

- reproduire la statique;
- reproduire la dynamique;
- paramétrer une signature.

Cette représentation pourrait être valable comme solution pratique dans la conception d'un système de vérification de signatures grâce à son aspect relativement simple (pas d'antagoniste), ce qui facilite l'extraction des paramètres. Mais cette représentation néglige un point important de la théorie des mouvements rapides. Dans cette théorie, c'est la connaissance par apprentissage du temps de mouvement (MT) qui permet d'enclencher la commande du trait suivant lorsque l'on a atteint une cible avec une certaine précision. Dans une courbe lognormale simple, la valeur du temps de mouvement — qui correspond au passage par zéro de la courbe — est infinie. Par contre, dans une delta-lognormale, l'antagoniste ramène ce MT à une durée finie, en provoquant un passage par zéro. Donc, si l'on veut bénéficier de l'aspect explicatif et

prédicatif des mouvements rapides reliés à cette théorie, il est nécessaire d'inclure un antagoniste non nul.

Les trois principes de base énoncés précédemment peuvent continuer d'être considéré vu l'importance qu'ils ont eu dans la représentation des signatures précédente. Par contre, dans le premier principe, il faut reconsidérer le critère "*négligeable*" des antagonistes que nous avons interprétés jusqu'à présent par "*nul*". L'action de ces derniers dans le cadre de mouvements appris, peut être faible — donc sous certains aspects, négligeable — mais ne doit pas être considéré comme nul. Pour le principe 3, comme la valeur de D_2 ne sera plus nulle, la précision ne sera plus infinie. Par contre, elle sera considérée comme relativement grande. La précision relative sera fixée par le rapport D_1/D_2 (voir équation 2.20 page 31), donné dans les conditions initiales de la régression non linéaire. Enfin, le principe 2 demeure inchangé. Dans cette dernière représentation des signatures, on considère toujours que "*l'influence d'un mouvement est restreinte dans le temps*". Ce principe s'est montré valide avec la précédente représentation pour assurer une cohérence temporelle dans l'enchaînement des traits.

Pour introduire "*la connaissance du MT*" dans notre représentation des signatures, l'étude faite au chapitre 3, va être prise en considération. Ainsi, nous allons imposer que le temps de mouvement MT soit directement lié à l'activité des antagonistes. Pour obtenir cette condition, nous savons, grâce à l'étude des courbes delta lognormales, que si les σ sont égaux et les μ différents, la relation $\mu_2 = \ln(MT)$ peut être obtenue dans le cas d'une courbe delta lognormale ayant un passage par zéro. Ce cas particulier est très intéressant, car un paramètre spécifique (μ_2) pourra ainsi être directement relié à l'activité des antagonistes. De plus, compte tenu de la "*mise en garde*" de la page 91, ceci permet de restreindre l'étendue des possibilités pour le modèle et, de favoriser le choix des conditions initiales.

Par conséquent, les conditions initiales seront maintenant fixées par une estimation de MT sur les profils de vitesse. En considérant que t_z est le temps auquel la courbe delta lognormale devrait passer par zéro, alors:

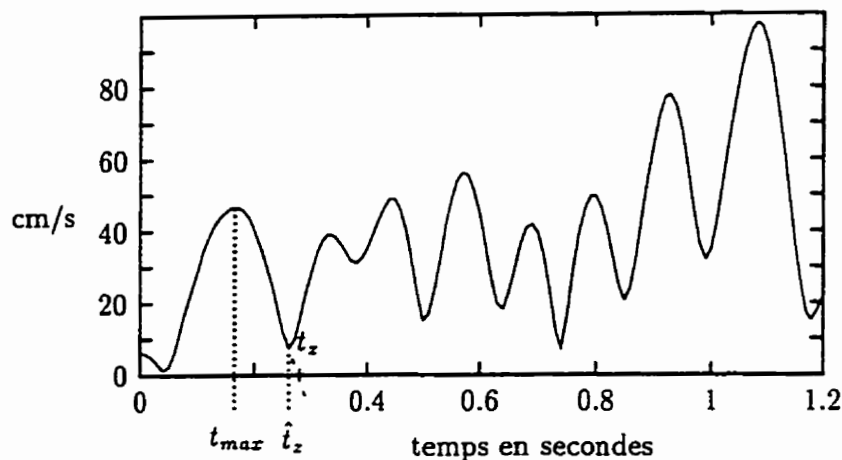


Figure 4.19: Détermination des conditions initiales de la régression

$$MT = t_z - t_0 \quad (4.21)$$

La valeur de t_z peut être estimée sur les profils de vitesse curviligne par le temps du passage par un minimum du module de la vitesse avec \hat{t}_z (voir figure 4.19). Ensuite, il faut obtenir une approximation pour t_0 . Pour y parvenir, nous nous sommes basés sur le temps du maximum en tenant compte de:

$$t_0 \approx t_{max} - t_l \quad (4.22)$$

où t_l est le temps qui s'écoule entre l'impulsion à t_0 et le maximum de la courbe de vitesse. La valeur de t_l s'apparente à un temps de latence, c'est pourquoi sa valeur sera fixée dans les conditions initiales. Dès lors, l'on obtient:

$$MT \approx \hat{t}_z - t_{max} + t_l \quad (4.23)$$

La valeur de MT peut être approximé directement à partir des profils de vitesse par la relation (4.23) puisque \hat{t}_z et t_{max} peuvent s'y déduire (voir figure 4.19). Une fois que la valeur de MT est déterminée, il reste à donner une valeur initiale à μ_2 par la relation (4.24), puis à μ_1 par (4.25), le rapport (R) de D_1 sur D_2 étant fixé.

$$\mu_2 = \ln(MT) \quad (4.24)$$

$$\mu_1 = \ln(MT) - \sqrt{2\sigma^2 \ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right)} \quad (4.25)$$

Considérant que R fixe la précision relative du mouvement (voir équation 2.20 page 31), un mouvement sera d'autant plus précis que la valeur de R est grande. De plus, selon le principe 1, comme on désire que les antagonistes soient faibles, il faut aussi que R soit grand. Toutefois, d'un autre côté, si R est trop grand — mouvement précis et antagonistes négligeables —, le mouvement est moins rapide (MT augmente avec R). Cette constatation a été relevé par W. Guerfali [22] sur de l'écriture manuscrites. De ces travaux, il en ressort également qu'il n'existe pas de choix particulier qui se distingue pour la valeur de R dans les conditions initiales de la régression. Compte tenu des résultats obtenus par W. Guerfali, nous avons fait le compromis d'utiliser un rapport de 10 entre les commandes des agonistes et des antagonistes pour avoir un mouvement rapide (valeur de R faible) et des antagonistes négligeables (valeur de R forte). Dans les travaux de W. Guerfali [22], la valeur de R a été fixée à 5. Dans notre cas, une valeur un peu plus élevée a été choisi pour mieux tenir compte du principe 1. Un peu plus loin, l'influence de la précision du mouvement sur l'aspect de la signature sera présenté en faisant varier la valeur de R .

Dans cette nouvelle approche les conditions initiales sont pratiquement toutes déterminées par une estimation graphique sur les profils de vitesses à partir d'une approximation de MT . Seuls t_l et σ , n'ont pas encore de valeur initiale fixée. Par contre pour σ , on sait que sa valeur doit être faible, en vertu du principe 2 et des

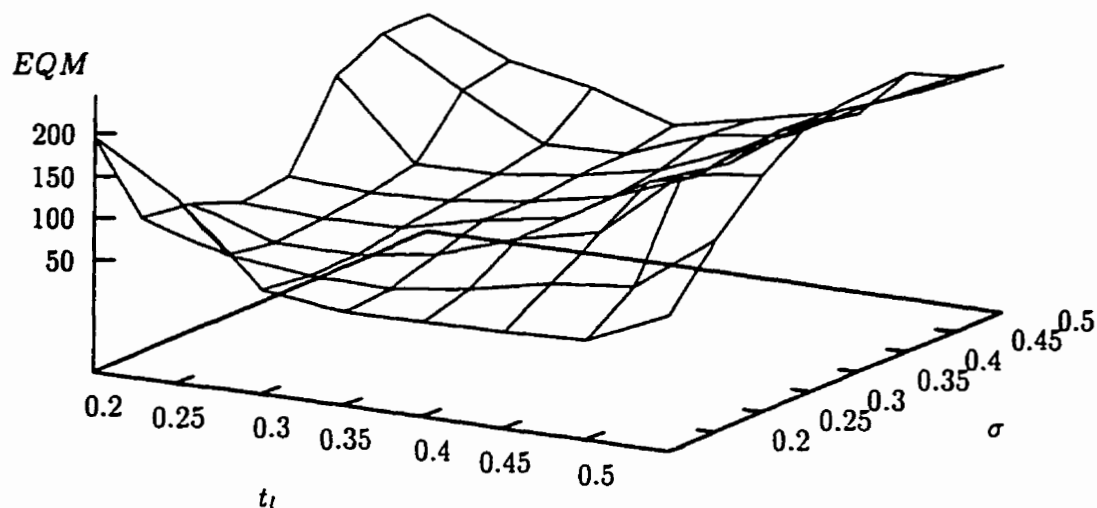


Figure 4.20: EQM en fonction de t_l et σ

résultats précédents. Idéalement sa valeur devrait être autour de 0.2. Pour t_l , on peut se baser sur les conditions initiales des résultats précédents ou reprendre l'étude de l'erreur quadratique moyenne (EQM) sur les 220 signatures mais cette fois en faisant varier t_l et σ . La figure 4.20 donne les résultats obtenues.

Cette figure a permis de choisir les conditions initiales pour la représentation des signatures. L' EQM la plus faible étant obtenue pour $t_l = 0.3$ et $\sigma = 0.15$, ces valeurs ont été choisies comme conditions initiales pour valider notre représentation. La valeur de $\sigma = 0.15$ est conforme au principe 2 puisque les faibles valeurs de σ produisent des courbes lognormales qui tendent rapidement vers zéro, donc leur influence est restreinte dans le temps. La figure 4.21 donne les résultats obtenus avec ces conditions initiales sur la signature test utilisée comme référence pour déterminer la représentation des signatures. Les figures 4.22 et 4.23 donnent la reconstruction de la cinématique obtenue grâce à la représentation des signatures. Sur ces figures, les losanges désignent toujours les signaux originaux échantillonnés à 100 Hz, tandis que les traits continus sont relatifs aux signaux synthétiques. La technique pour obtenir les

profils de vitesse — curviligne et angulaire — sera présenté dans le chapitre suivant. Celle-ci est basée sur l'utilisation de filtre numérique dérivatif.

4.4 Énoncé de la représentation

Suite aux résultats obtenus dans les sections précédentes, un énoncé de la représentation de la signature peut être donnée. Cette énoncé correspond à l'objectif principal de cette thèse.

Selon la représentation à laquelle on est arrivé, le processus de signer peut être illustré par la figure 4.24 page 118. Sur cette figure, nous avons pris la liberté de présenter le diagramme de flux de données dans le sens verticale avec les entrées (une seule dans ce cas) en haut plutôt qu'à gauche comme le veut normalement la convention. Ce choix a été fait pour placer en haut de la figure la représentation haut niveau de la signature. La description de ce processus permet de mieux comprendre comment est planifiée l'action de signer.

À haut niveau, la signature peut être décrite, grâce au modèle delta lognormal vectoriel et la théorie cinématique, par un ensemble de cibles virtuelles. Ces dernières sont reliées entre elles par des traits de courbure constante (C_0) et d'angle initial (θ_0).

Connaissant la courbure et la position des cibles virtuelles, le système nerveux central peut évaluer la distance à parcourir pour aller d'une cible à la suivante. Par conséquent, sous une forme ou une autre, on doit retrouver codé à haut niveau les paramètres D_i , C_0 , et θ_0 . Ensuite pour la génération du mouvement, il reste un paramètre à fixer pour pouvoir produire la signature: la précision spatiale relative (R). Une fois celle-ci connue ou fixée par le système nerveux central, les commandes pour chaque trait — couple D_1 et D_2 — peuvent activer à la synergie pour produire la signature. Cette ensemble de paramètres constitue ce que l'on peut désigner comme la description à haut niveau de la signature.

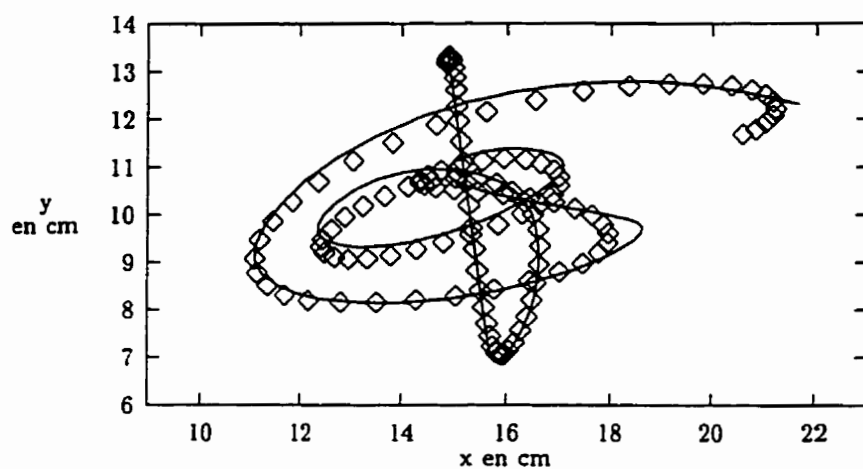


Figure 4.21: Signature synthétique.

Tableau 4.6: Paramètres de la signature de la figure 4.21

t_o	D_1	μ_1	σ_1	D_2	μ_2	σ_2	θ_0	C_0
-0.63	7.377	-0.23	0.074	0.738	-0.11	0.074	4.8377	0.0000
0.07	4.541	-1.31	0.181	0.454	-0.62	0.181	7.1727	0.2530
0.19	5.296	-1.32	0.150	0.530	-0.99	0.150	2.8399	0.2634
0.29	6.287	-1.26	0.150	0.629	-0.94	0.150	6.1644	0.1517
0.43	3.629	-1.32	0.150	0.363	-0.99	0.150	2.6934	0.3079
0.52	5.416	-1.29	0.150	0.542	-0.97	0.150	6.1256	0.0000
0.58	10.229	-1.02	0.150	1.023	-0.69	0.150	3.7359	-0.0972
0.71	13.690	-0.96	0.150	1.369	-0.63	0.150	0.8979	-0.0917

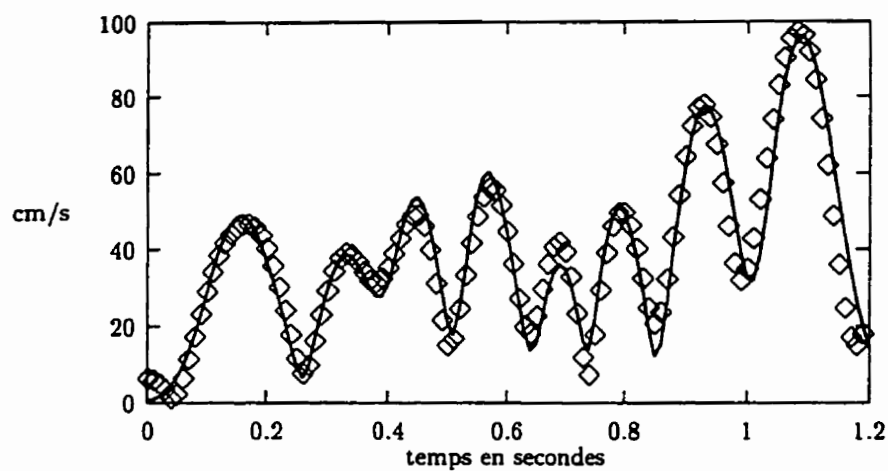


Figure 4.22: Profil de la vitesse curviligne de la signature de la figure 4.21

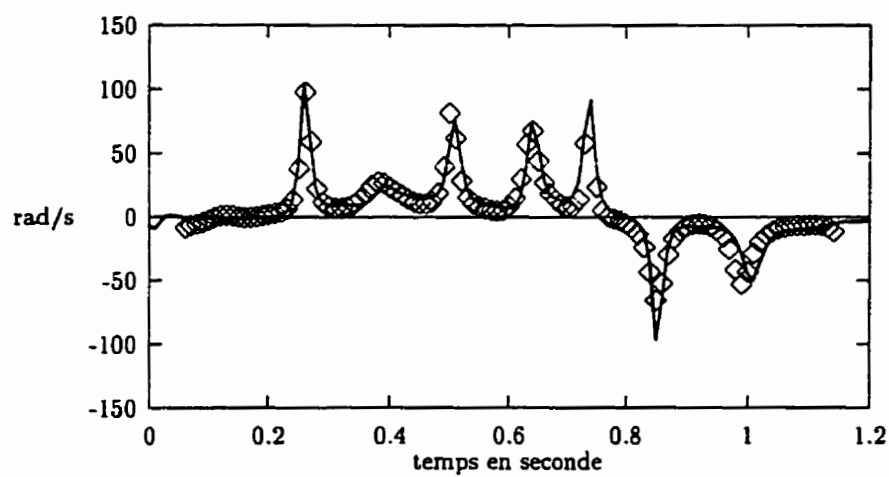


Figure 4.23: Profil de la vitesse angulaire de la signature de la figure 4.21

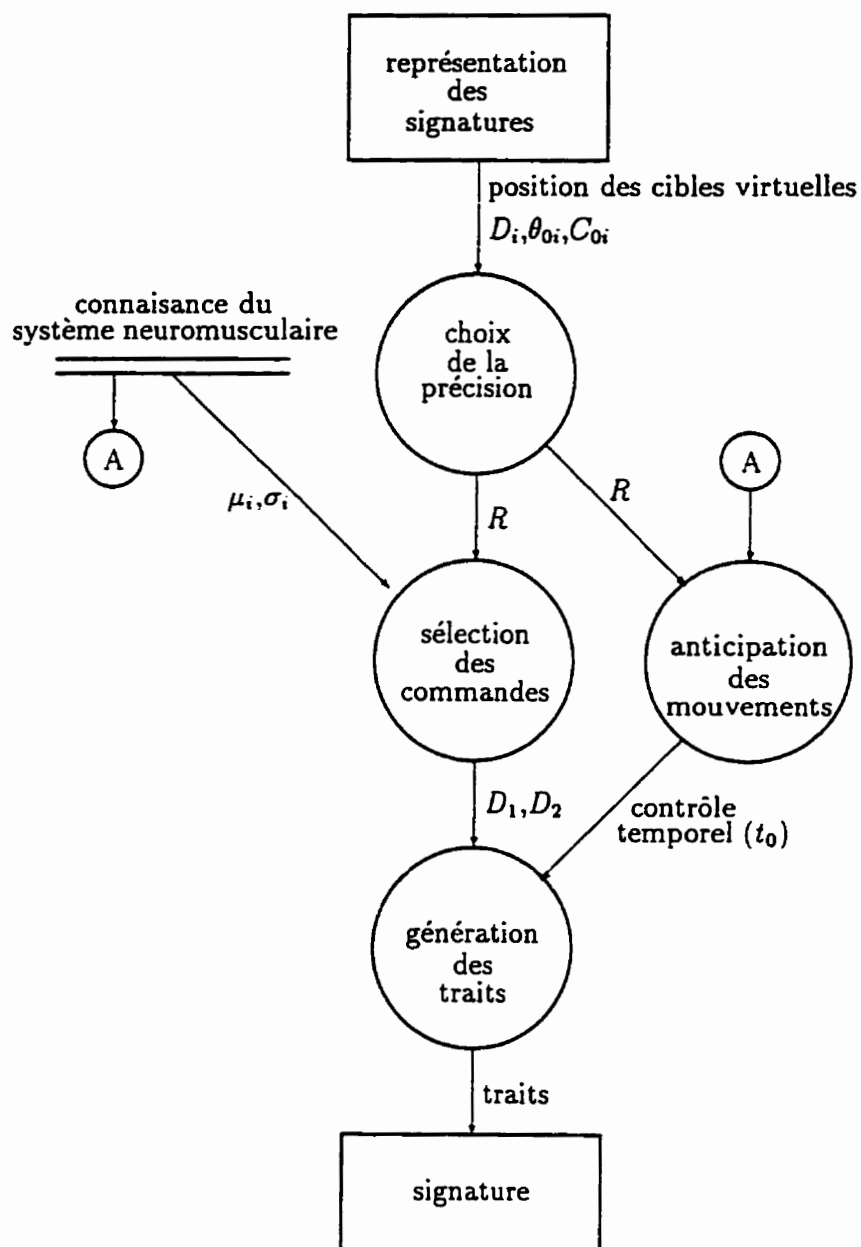


Figure 4.24: Processus plausible de génération des signatures

Cependant, jusqu'à maintenant, la représentation de la signature ne fait intervenir que l'image de celle-ci. Il reste à introduire la notion de temps d'amorce (t_0) des différents traits. L'introduction de l'aspect temporel de la signature, est rendue possible par la présence du système neuromusculaire antagoniste avec la notion de temps de mouvement qu'il apporte (MT). Celui-ci revêt donc une importance capitale pour illustrer clairement le geste complexe de signer.

Suite à l'apprentissage du mouvement, les paramètres neuromusculaires agonistes et antagonistes sont connus du système nerveux central. Sur la base de cette apprentissage le cerveau peut évaluer à quel moment (MT), il va atteindre la cible virtuelle avec la précision qu'il s'est fixée. Par conséquent, il pourra délivrer chaque commande au moment propice afin de produire la signature avec un chevauchement plus ou moins important des traits.

Pour résumer, la représentation fait intervenir:

- un codage haut niveau de l'image de la signature constitué d'un ensemble de cibles virtuelles et de traits caractéristiques (D , C_0 et θ_0);
- le choix d'un facteur de précision relative (R);
- la planification de la commande (couple D_1 et D_2) déduite de la précision voulue avec la relation 4.26;

$$\begin{cases} D = D_1 - D_2 \\ R = D_1/D_2 \end{cases} \quad \begin{cases} D_1 = \frac{R}{R-1} \times D \\ D_2 = \frac{1}{R-1} \times D \end{cases} \quad (4.26)$$

- le contrôle temporel du mouvement (t_0) par la connaissance, après apprentissage, des paramètres du système neuromusculaire (μ_i , σ_i). La connaissance de ces paramètres permet l'anticipation grâce à la détermination de MT : temps pour atteindre la cible avec une précision relative fixée.

Sur la base de cette représentation, nous allons maintenant voir les avantages que

celle-ci apporte pour différents transformations telles les translations, les rotations et les homothéties spatiales et temporelles.

De plus les paramètres des systèmes neuromusculaires agonistes et antagonistes étant sujet à des variations (ex: fatigue), nous verrons, dans un cas particulier, comment elles influencent le tracé d'une signature.

4.5 Avantages de la représentation des signatures

Pour le développement futur d'un système de vérification de signatures basé sur la représentation des signatures il sera nécessaire d'aborder :

- la normalisation en taille,
- la normalisation en durée,
- la normalisation de la position de la signature et de son orientation.

Dans les sections qui suivent, nous allons montrer comment la représentation des signatures gère: la taille, la durée, la position et l'orientation d'une signature.

4.5.1 Gestion de la taille d'une signature

La normalisation de la taille de la signature est importante lorsque l'on doit comparer des caractéristiques géométriques de la signatures ou son image. Ainsi, si l'on doit comparer plusieurs signatures d'un même individu, il y a de forte chance pour que ces différentes signatures n'aient pas la même taille.

En règle générale, cette normalisation se fait en prenant les dimensions du rectangle dans lequel s'inscrit la signature que l'on peut ramener à des dimensions fixes ou à la dimension d'une des 2 signatures à comparer, la référence ou la signature à tester.

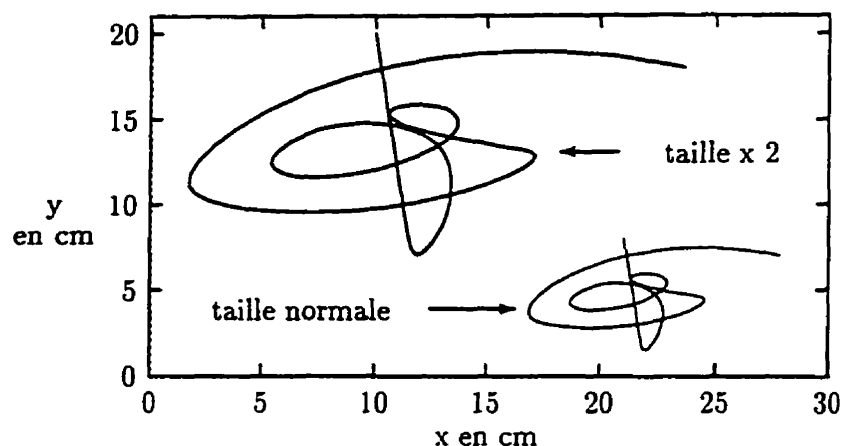


Figure 4.25: Changement de la taille d'une signature($\times 2$)

Avec le modèle delta lognormal vectoriel, les paramètres que l'on extrait pour la représentation de la signature permettent de la générer à n'importe quelle taille. La figure 4.25 montre une même signature dont l'une d'elle a vu sa taille multipliée par 2. Ainsi, grâce au modèle, une réduction ou une augmentation de la taille d'une signature s'obtient très facilement à partir des paramètres extraits. Par exemple, pour obtenir une variation de taille d'un facteur k il suffit de multiplier les paramètres D_1 et D_2 par k et diviser les paramètres C_0 par k alors que tous les autres paramètres restent inchangés.

Ainsi, avec $k = 2.0$, nous obtenons à partir des paramètres du tableau 4.7 les nouvelles valeurs données dans le tableau 4.8. Les paramètres des tableaux 4.7 et 4.8 correspondent aux deux signatures de la figure 4.25.

La représentation proposée ne nécessite donc pas de normalisation du tracé pour effectuer les traitements qui conduisent à paramétrer la signature. Sans être invariante aux homothéties spatiales, la variation de taille affecte spécifiquement 3 paramètres (D_1 , D_2 et C_0). Une fois la représentation d'une signature obtenue, il est facile de ramener la signature à une taille normalisée grâce à un facteur multiplicatif

Tableau 4.7: Paramètres de la signature de taille normale

t_o	D_1	μ_1	σ_1	D_2	μ_2	σ_2	θ_0	C_0
-0.09	7.449	-1.32	0.203	0.810	-0.92	0.203	4.8377	0.0000
0.10	4.489	-1.42	0.201	0.403	-0.98	0.201	7.1727	0.2530
0.22	5.340	-1.43	0.199	0.574	-1.03	0.199	2.8399	0.2634
0.33	6.375	-1.37	0.198	0.717	-0.96	0.198	6.1644	0.1517
0.46	3.646	-1.43	0.193	0.380	-0.97	0.193	2.6934	0.3079
0.55	5.327	-1.40	0.197	0.453	-0.97	0.197	6.1256	0.0000
0.69	10.262	-1.39	0.198	1.055	-0.94	0.198	3.7359	-0.0972
0.82	13.712	-1.30	0.199	1.391	-0.85	0.199	0.8979	-0.0917

Tableau 4.8: Paramètres de la signature de taille $\times 2$

t_o	D_1	μ_1	σ_1	D_2	μ_2	σ_2	θ_0	C_0
-0.09	14.898	-1.32	0.203	1.620	-0.92	0.203	4.8377	0.0000
0.10	8.978	-1.42	0.201	0.806	-0.98	0.201	7.1727	0.1265
0.22	10.680	-1.43	0.199	1.148	-1.03	0.199	2.8399	0.1317
0.33	12.750	-1.37	0.198	1.434	-0.96	0.198	6.1644	0.0759
0.46	7.292	-1.43	0.193	0.760	-0.97	0.193	2.6934	0.1540
0.55	10.654	-1.40	0.197	0.906	-0.97	0.197	6.1256	0.0000
0.69	20.524	-1.39	0.198	2.110	-0.94	0.198	3.7359	-0.0486
0.82	27.424	-1.30	0.199	2.782	-0.85	0.199	0.8979	-0.0459

k . Ce facteur pourrait être déterminé par une régression linéaire entre les paramètres D_1 , D_2 et C_0 de la signature de référence et ceux de la signature test.

4.5.2 Gestion de la durée d'une signature

La durée d'une signature peut être aisément changée grâce aux paramètres μ_1 et μ_2 . Cette propriété de pouvoir générer une signature à n'importe quelle durée vient, comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, du fait que μ est un paramètre d'échelle temporelle dans une courbe lognormale. Ainsi pour diviser la durée d'une signature par 2, il suffit de diviser les différentes valeurs de t_0 par 2 (compression de l'échelle de temps par 2) et ajouter $\ln(1/2)$ à tous les μ (μ_1 et μ_2). La figure 4.26 donne le résultat d'un tel changement de durée. Sur cette figure, les points d'échantillonnage sur le tracé permettent de rendre compte de la différence de durée (donc de vitesse d'exécution) entre les 2 signatures. Les points moins nombreux réfèrent à la signature la plus rapide.

Le tableau 4.9 donne les paramètres de la signature exécutée 2 fois plus vite. Les paramètres initiaux de la signature normale sont ceux du tableau 4.7.

La même remarque que pour la taille peut s'appliquer à la durée pour les homothétie temporelle. Ensuite la normalisation peut s'effectuer très facilement par la modification de paramètres appropriés afin de générer la signature avec n'importe quelle base de temps.

4.5.3 Gestion de position et de l'orientation d'une signature

La représentation de la signature est totalement indépendante de la position dans l'espace de celle-ci. Ainsi une signature peut être générée où bon vous semble. La position de la signature dépend de la coordonnée d'origine choisie pour le premier point du tracé. La figure 4.26 illustre cette facilité puisque pour les besoins de la comparaison de signatures de durée différentes, celles-ci ont été générées à des endroits distincts.

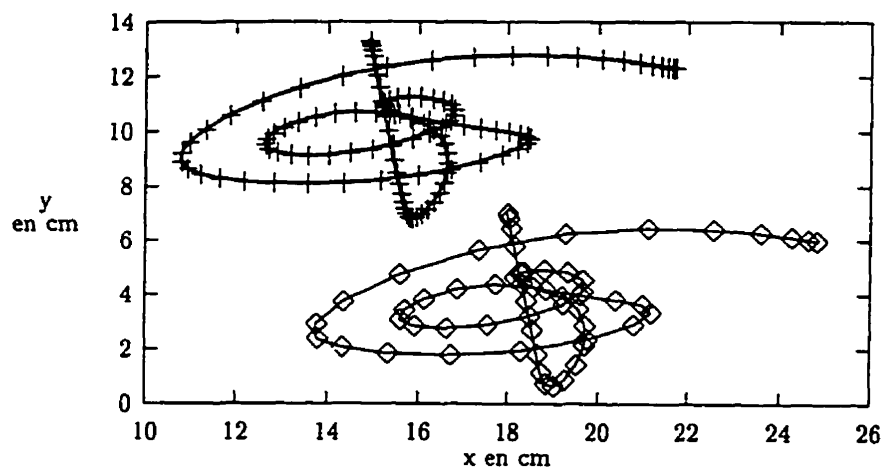


Figure 4.26: Changement de la durée d'une signature

Tableau 4.9: Paramètres d'une signature 2 fois plus rapide

t_o	D_1	μ_1	σ_1	D_2	μ_2	σ_2	θ_0	C_0
-0.04	7.449	-2.01	0.203	0.810	-1.61	0.203	4.8377	0.0000
0.05	4.489	-2.11	0.201	0.403	-1.67	0.201	7.1727	0.2530
0.11	5.340	-2.12	0.199	0.574	-1.72	0.199	2.8399	0.2634
0.17	6.375	-2.06	0.198	0.717	-1.65	0.198	6.1644	0.1517
0.23	3.646	-2.12	0.193	0.380	-1.66	0.193	2.6934	0.3079
0.28	5.327	-2.09	0.197	0.453	-1.66	0.197	6.1256	0.0000
0.34	10.262	-2.08	0.198	1.055	-1.63	0.198	3.7359	-0.0972
0.41	13.712	-1.99	0.199	1.391	-1.54	0.199	0.8979	-0.0917

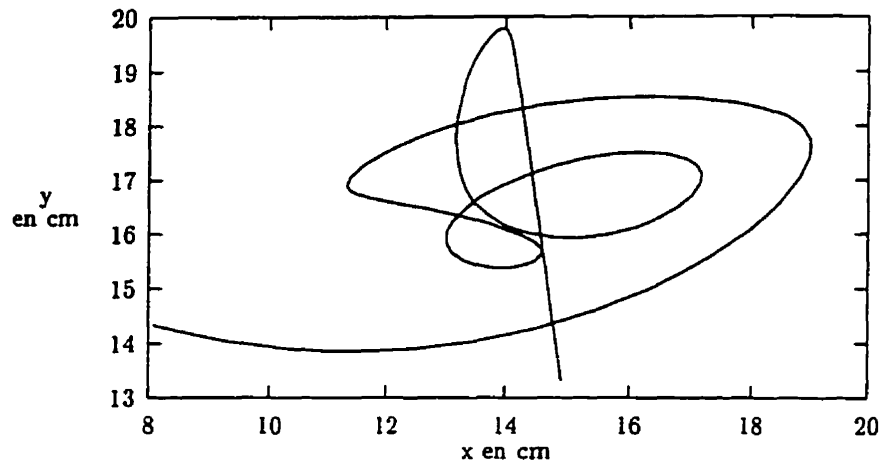


Figure 4.27: Rotation de 180 degré d'une signature

De même, il est possible de faire subir une rotation à la signature assez aisément. Pour cela il faut modifier tous les paramètres θ_0 en leur ajoutant l'angle de la rotation que l'on veut faire subir à la signature. La figure 4.27 illustre un cas extrême : une rotation de 180 degré.

Une signature pouvant être produite sur une tablette dans n'importe quelle direction, selon l'orientation de celle-ci, on doit en tenir compte après l'obtention de la représentation des signatures. Ainsi, par une correction des paramètres θ_0 , il est possible de corriger n'importe quelle rotation du système d'acquisition pour donner à la signature test avec la même orientation que la signature de référence.

Avec la gestion de la taille (homothétie spatiale), de la durée de la signature (homothétie temporelle), de la position (translation) et de l'orientation de la signature nous venons de voir comment se comporte la représentation proposée dans cette thèse, vis à vis de ces transformations. Celle-ci permet de réaliser ces différents types de transformations très facilement uniquement en multipliant un ou plusieurs paramètres par un facteur. Ceci nous permet de conclure que la représentation proposée respecte

tous les critères énoncés dans l'introduction pour obtenir une représentation idéale des signatures.

4.6 Variation de la précision

Dans cette section, la précision d'exécution des signatures va être modifiée afin d'analyser son influence. Ce type d'expérience permet de montrer d'autres potentialités offertes par la représentation des signatures proposées dans cette thèse. Pour cela une signature dont les paramètres respectent les conditions de la section 3.2.2 va être utilisée (voir tableau 4.10). Ces paramètres sont spécifiques d'un passage par zéro de la courbe delta lognormale avec $\mu_2 = \ln(MT)$. Par conséquent les valeurs de MT pour chaque trait peuvent être déterminées par les caractéristiques neuromusculaires des antagonistes (μ_2). Pour faire varier la précision et analyser son influence sur les signatures, deux possibilités sont offertes:

- faire varier le rapport des commandes D_1 sur D_2 uniquement en maintenant leur différence constante (première possibilité);
- faire varier le rapport des commandes D_1 sur D_2 — avec leur différence constante — en conservant les valeurs de MT de chaque trait par rapport à la signature de référence (deuxième possibilité).

Dans la première possibilité, seules les commandes D_1 et D_2 changent afin de modifier la précision spatiale relative tout en conservant la distance parcourue entre les cibles virtuelles (la différence de D_1 et D_2). Ce changement implique que l'on ne respectera plus les conditions spécifiques de la signature de référence ($\mu_2 = \ln(MT)$) après changement de la précision. Par conséquent, les valeurs de MT de chaque trait vont nécessairement changer par rapport à la signature de référence.

Dans la deuxième possibilité, les différentes valeurs de MT vont rester les mêmes que ceux de la signature de référence. Ceci, nous ramène à l'étude des courbes delta

Tableau 4.10: Paramètres de la signature de référence

t_o	D_1	μ_1	σ_1	D_2	μ_2	σ_2	θ_0	C_0
-0.60	7.377	-0.27	0.074	0.738	-0.11	0.074	4.8377	0.0000
0.01	4.541	-1.12	0.150	0.454	-0.80	0.150	7.1727	0.2530
0.19	5.296	-1.31	0.150	0.530	-0.99	0.150	2.8399	0.2634
0.29	6.287	-1.26	0.150	0.629	-0.94	0.150	6.1644	0.1517
0.43	3.629	-1.31	0.150	0.363	-0.99	0.150	2.6934	0.3079
0.52	5.416	-1.29	0.150	0.542	-0.97	0.150	6.1256	0.0000
0.58	10.229	-1.01	0.150	1.023	-0.69	0.150	3.7359	-0.0972
0.71	13.690	-0.95	0.150	1.369	-0.63	0.150	0.8979	-0.0917

lognormales faite dans le chapitre 3. Une partie des résultats de cette étude va être utilisée pour maintenir les valeurs de MT constantes, malgré le changement de précision.

Les sections 4.6.1 et 4.6.2 traitent respectivement de ces deux possibilités. Dans chacune d'elle, la signature de référence a une valeur du rapport D_1 sur D_2 (R) fixée à 10. Ce rapport est conforme au choix fait pour les conditions initiales de l'extraction des paramètres par la régression non linéaire.

4.6.1 Première possibilité

Dans cette première possibilité, on change la précision soit en l'augmentant ou en la diminuant par rapport à la signature de référence pour laquelle $R = 10$.

Pour l'augmentation de la précision ce rapport passe de 10 à 100. Dans ce cas on peut constater sur la figure 4.28 que la signature "colle" plus aux différents traits constituant la signature qui sont matérialisés par des pointillés. Ces derniers correspondent à ce que serait le tracé s'il n'y avait aucun chevauchement temporelle des traits. Avec une précision plus grande, la signature reste harmonieuse (avec de belle courbe) et ressemble beaucoup à la signature de référence qui pourtant est moins précise. Sur ces figures et dans celles qui suivent, les signatures ont toutes la même durée.

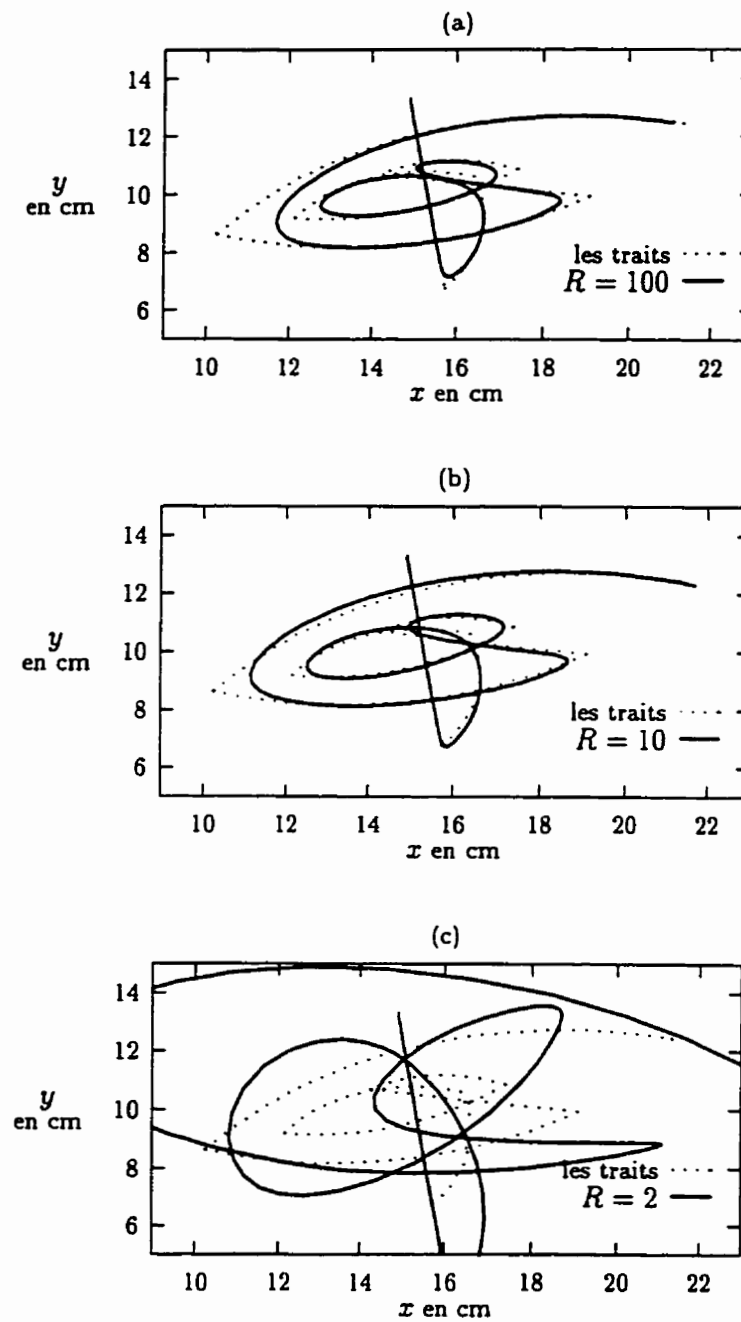


Figure 4.28: Variation de la précision

Pour une diminution de la précision, le rapport des commandes agoniste versus antagoniste passe de 10 à 2. Ce faible rapport fait en sorte que la commande antagoniste est proche de celle des agonistes. Cette fois-ci, on constate que la signature est fortement perturbée (voir figure 4.28). Le tracé s'éloigne beaucoup des traits constituant la signature. Cette signature correspond à des mouvements très brusques car les agonistes sont contrecarrés par un antagoniste très importants.

4.6.2 Deuxième possibilité

Dans cette deuxième possibilité, on cherche à faire varier la précision mais cette fois en conservant les valeurs de MT de chaque trait de la signature de référence. Pour cela on s'appuie sur les travaux présentés dans le chapitre 3 avec l'étude des courbes delta lognormales. Dans ce chapitre, nous avons entre autre étudié la variation des profils de vitesse suite à un changement de précision en conservant MT constant. Maintenant nous présentons l'influence d'un tel protocole sur un tracé complexe.

Suite à un changement de précision, nous avons fait ressortir au chapitre 3 que l'on peut procéder de deux façons soit:

- compenser avec le paramètre μ_1 ;
- compenser avec le paramètre σ .

Si on compense avec μ_1 et que l'on augmente la précision spatiale, on constate de nouveau que la signature se rapproche des traits constitutants (voir figure 4.29 a). D'ailleurs, on peut constater que ce rapprochement est plus marqué que celui du cas précédent (figure 4.28) avec la même précision.

Si la précision diminue (voir figure 4.29 c) et que l'on garde les mêmes valeurs de MT , on constate que la signature est moins perturbée comparée au cas $R = 2$ de la figure 4.28. Donc, un contrôle neuromusculaire des MT semble bénéfique pour la génération des signatures. Ceci rejoint les observations de N. M. Herbst [27] sur la stabilité en durée des signatures. Cette observation est supportée par la représentation

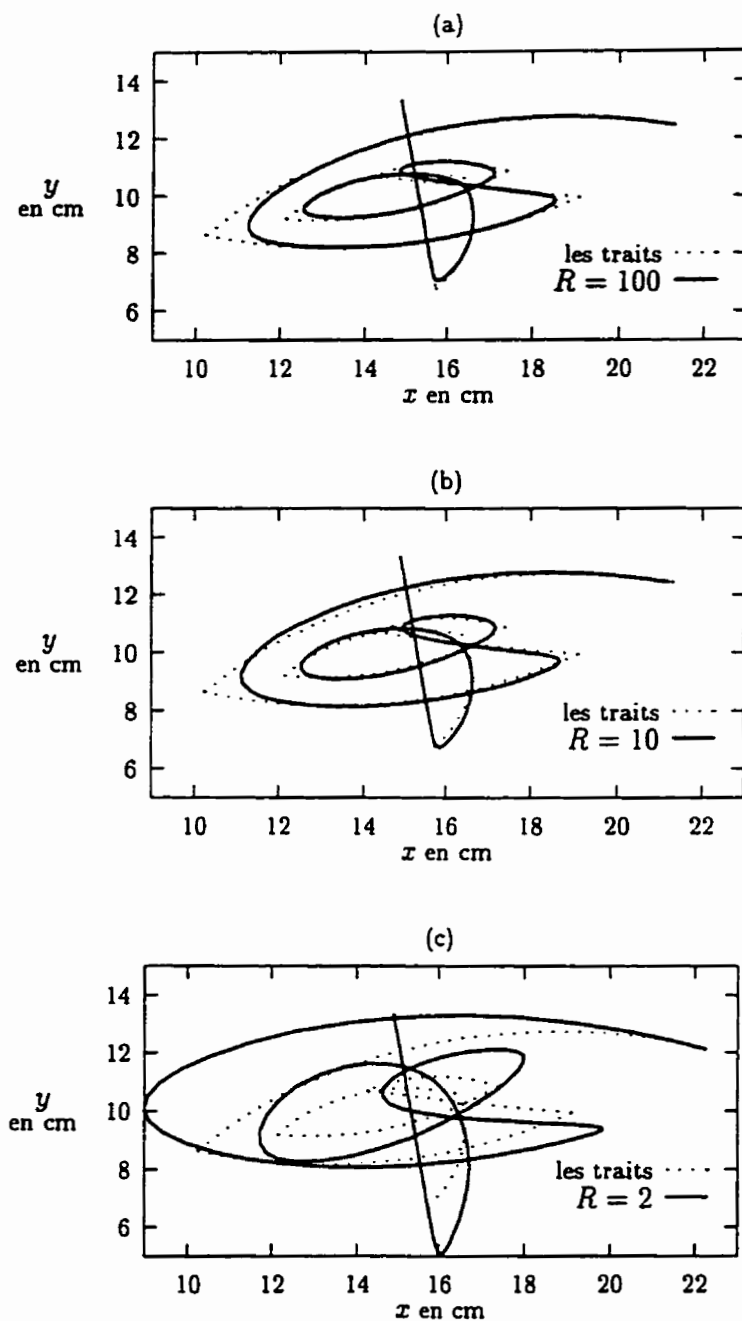


Figure 4.29: Variation de la précision avec compensation par μ pour conserver les mêmes MT

des signatures et ainsi on peut effectivement penser que pour des mouvements appris comme une signature, si la précision du mouvement change, les *MT* peuvent rester les mêmes ce qui permet de mieux accepter les variations de précision et de produire des signatures qui reste “*lisible*” même pour de très faible précision (voir cas $R = 2$ de la figure 4.29).

Si les variations de précision sont compensées par σ plutôt que μ_1 , on constate à peu près le même résultat, c’est à dire que le maintien des *MT* permet de garder des signatures d’apparence acceptable même pour des rapport D_1 sur D_2 faible (voir cas $R = 2$ de la figure 4.30). Par contre la compensation par σ a un effet visuel plus important sur l’image des signatures si on compare les figures 4.29 et 4.30. Ainsi, à précision plus élevée les signatures compensées par σ au lieu de μ_1 , deviennent plus anguleuse, ceci à cause d’un chevauchement temporelle moins importante dans la génération des traits. On se rapproche de la décomposition de la signature en traits, ce qui enlève du naturel à la signature qui devient moins harmonieuse, plus discontinue. Enfin, pour des précisions plus faibles, la superposition devient importante au point d’être plus “gênante” pour l’aspect visuel de la signature. La signature s’éloigne de plus en plus du tracé initial et ceci à cause de la traînée de la queue de la courbe delta lognormale qui devient important pour les mouvements de faible précision. Ceci rejoint l’importance du principe 2 énoncé au chapitre 4 où l’on indique que le chevauchement des traits doit être restreint dans le temps. Avec une compensation par σ , pour de faible précision spatiale, on constate que le chevauchement des mouvements atteint plusieurs traits ce qui donne des perturbations qui se cumule dans le temps.

Compte tenu qu’une compensation par μ_1 semble moins perturber l’image d’une signature, on peut penser que c’est la stratégie employée pour la génération des mouvements appris tels que les signatures. De plus, si on peut supposer que les paramètres μ_1 sont liés à la durée des trains d’impulsions utilisées pour la commande des muscles, alors on peut penser qu’un mouvement appris sera contrôlé par μ_1 — adaptation à un changement d’état du système neuromusculaire — plutôt que σ et que

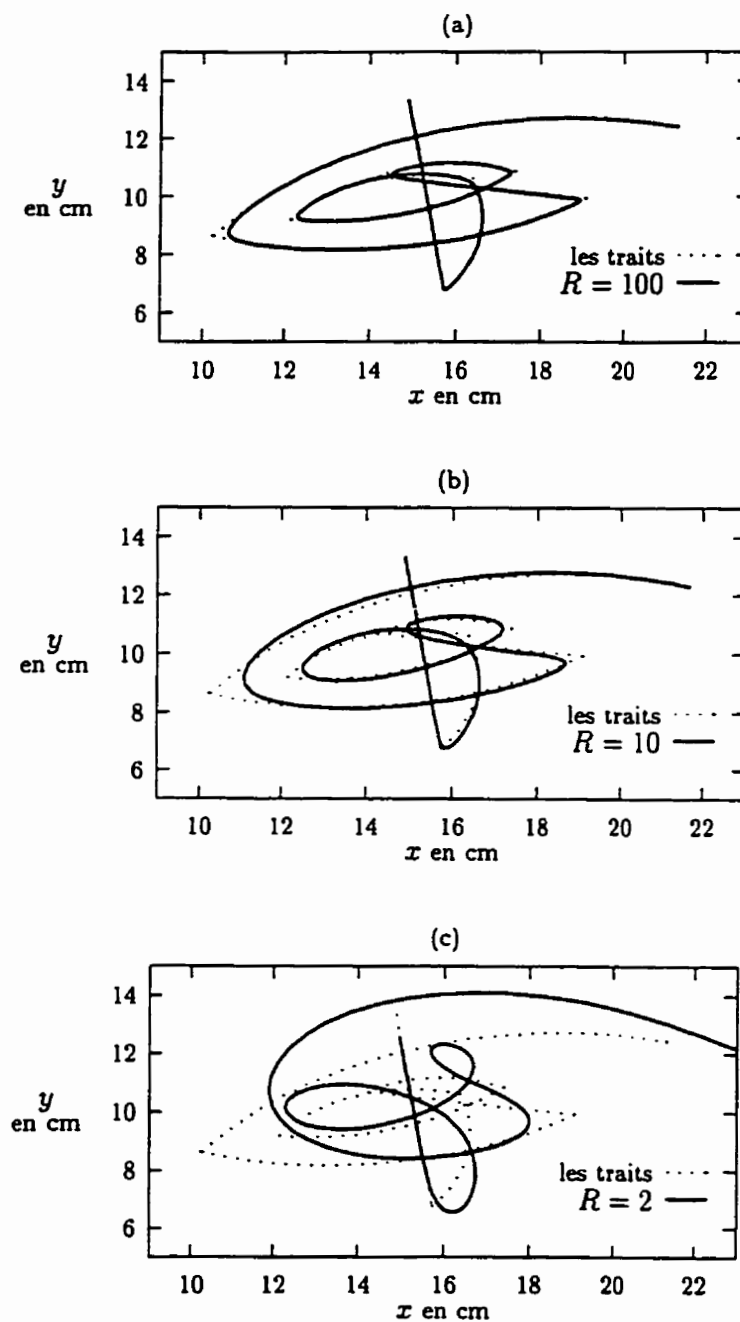


Figure 4.30: Variation de la précision avec compensation par σ pour conserver les mêmes MT

par conséquent σ serait un paramètre plutôt lié à l'état du système neuromusculaire. Par contre, la valeur de σ devrait normalement être faible pour limiter l'influence d'un mouvement dans le temps.

4.7 Précision constante

Pour finir sur les avantages que peut apporter la représentation des signatures pour l'étude et la compréhension des mouvements complexes, il est possible de garder la précision constante ainsi que les MT tout en changeant les valeurs des paramètres neuromusculaires. Dans le chapitre 3, nous avons vu par exemple qu'il est possible de compenser des variations du paramètre μ_1 suite à des variations de σ et *vis et versa* afin d'obtenir des mouvements de même précision et de même MT .

Puisque la compensation est mutuelle, nous avons choisi de faire varier σ et de calculer la valeur de μ_1 correspondante (voir relation 3.42 page 54), afin de se placer dans le même cas de l'étude réalisée au chapitre 3. La valeur de σ varie respectivement de -30% et $+30\%$ par rapport à la signature de référence dont les paramètres sont donnés dans le tableau 4.10 page 127. La figure 4.31 montre l'influence de ce changement sur l'image de la signature. Cette fois-ci, la signature de référence est présentée en pointillés sur chaque graphique. Là encore, on peut constater l'effet de superposition des traits sur l'image de la signature.

Par rapport à un système neuromusculaire connu, si une signature possède une représentation haut niveau impliquant la précision et le MT , alors de petites variations du système neuromusculaire peuvent être compensées par un changement mutuel de certains paramètres afin de conserver une signature d'aspect acceptable. Si un paramètre tel que σ est indirectement influencé par l'état du système neuromusculaire (*ex*: fatigue) ou le matériel pour signer, une compensation peut s'installer grâce aux paramètres μ_1 pour conserver l'aspect de la signature.

Finalement, ceci permet de montrer l'intérêt de notre représentation des signatures

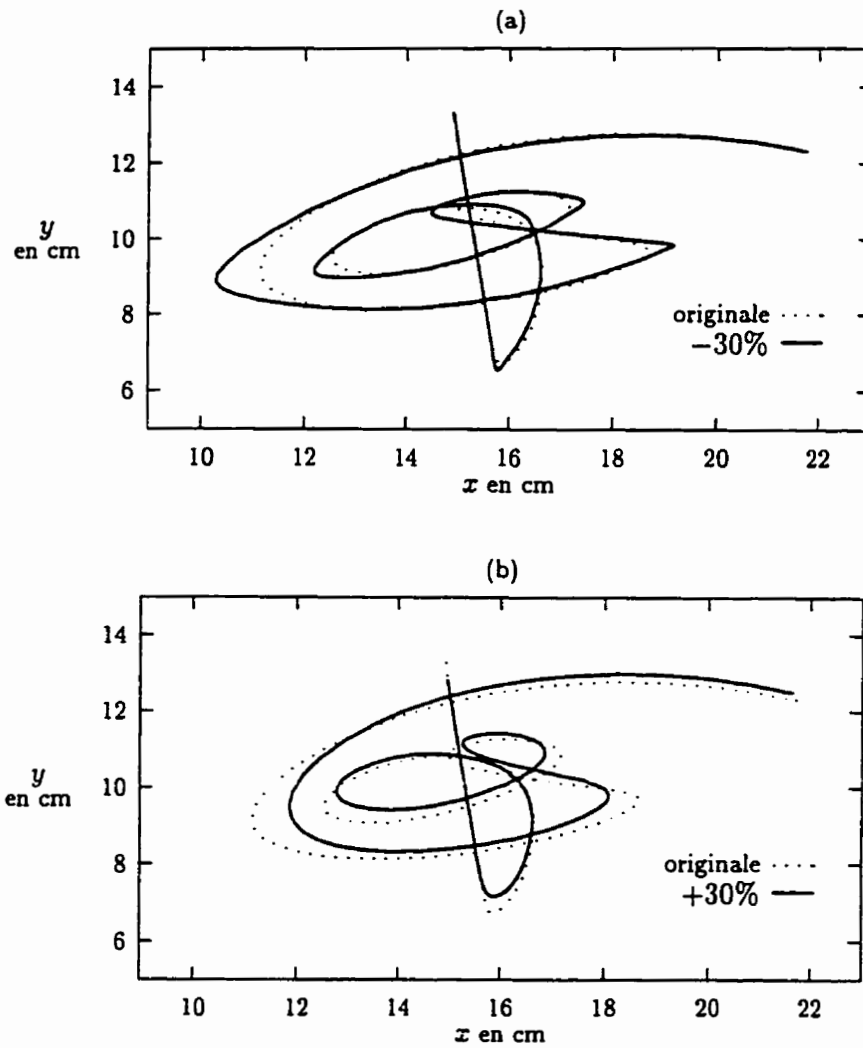


Figure 4.31: Variation de σ à précision spatiale relative constante avec une compensation par μ_1

pour la compréhension du processus de génération des signatures. La section suivante va maintenant résumer les points importants de ce chapitre.

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, deux aspects ont été présentés: la génération avec le modèle — de traits simple ou complexe — et la représentation des signatures découlant de trois 3 principes de bases. Suite à l'énoncé de la représentation, nous avons montré ses avantages pour différents types de transformation (rotation, translation, homothétie spatiale et temporelle) et ses implications dans la description du geste de signer.

La représentation de la signature constitue la plus grande partie du chapitre et l'originalité de cette thèse. En partant d'une simplification qui se base sur trois principes, une première représentation des signatures sans antagonistes a été construite avec l'utilisation d'une lognormale simple pour modéliser la cinématique. Ensuite la considération du temps de mouvement (MT) a été ajoutée à cette représentation. Pour cela, le cas où le temps de mouvement est fixé par les antagonistes — résultat qui découle de l'étude des courbes delta lognormales du chapitre 3 — a été retenu. Ainsi, selon les critères donnés dans le chapitre 1 pour une bonne représentation des signatures, nous savons que celle qui est proposée permet qualitativement:

- de reproduire la statique ;
- de reproduire la dynamique ;
- de paramétrer une signature ;
- d'accepter les différentes transformations suivantes: translation, rotation, homothétie temporelle et spatiale.

La représentation proposée dans cette thèse a l'avantage de ne pas dépendre au moment de l'extraction des paramètres, de la taille, de la durée, de la position et de

l'orientation de la signature. Ensuite disposant des paramètres et compte tenu de la facilité avec laquelle le modèle gère ceux-ci, la représentation permet d'éluder les problèmes de normalisation auxquelles sont confrontés les concepteurs de systèmes de vérification de signatures.

Outre les avantages liés à la réalisation d'un système de signatures, la représentation offre un outil permettant de comprendre le mouvement engendré par la signature. Par une étude faisant intervenir la précision et la durée du mouvement, ce chapitre a également permis de montrer le potentiel explicatif d'une telle représentation.

Comme la représentation permet de décrire le processus de génération de signatures et que celle-ci fait intervenir des paramètres hauts niveaux et neuromusculaires, l'extraction de ces derniers devrait permettre d'identifier les individus en donnant une sorte d'empreinte *biométrique*. Par conséquent la représentation des signatures répond partiellement à la question posée dans l'introduction. Un système de vérification de signatures basé sur cette représentation pourrait appartenir à la classe 4 (systèmes biométriques).

Cette représentation ayant pour l'instant démontré qualitativement son potentiel uniquement sur une signature test, le chapitre suivant va aborder sa validation quantitative sur une banque de 220 signatures.

Chapitre 5

VALIDATION DE LA REPRÉSENTATION DES SIGNATURES

Dans le chapitre précédent, une représentation des signatures — basée sur le modèle delta lognormal vectoriel — a été proposée. Cette représentation utilise un cas particulier des courbes delta lognormales pour les conditions initiales des régressions non linéaires — paramètres σ des agonistes et antagonistes égaux — et repose sur trois principes. À partir de celle-ci, nous avons pu montrer qu'il est possible de reproduire qualitativement la statique (l'image) et la cinématique d'une signature grâce à l'extraction des paramètres réalisée en deux étapes. De plus la représentation a permis de décrire le processus mis en œuvre dans l'action de signer ce qui en fait un bon candidat pour développer des systèmes de vérification de l'identité de classe 4.

Dans ce chapitre, la représentation des signatures va être validée quantitativement sur une banque de 220 signatures. Suite à la validation de celle-ci, et à l'extraction des paramètres sur toute la banque de signatures, une évaluation de la compression de données sera présentée. Ce dernier point constitue un avantage majeur par rapport à d'autres représentations (ex.: par fonction) dans la réalisation de systèmes

automatique de vérification de signatures.

5.1 Description de la banque de signatures

Pour valider notre représentation des signatures, 22 individus ont été sélectionnés de façon à couvrir quatre grands types de signatures:

- les signatures nord-américaines;
- les signatures européennes;
- les signatures chinoises;
- les signatures arabes.

La figure 5.1 présente un exemple typique pour chacun de ces types de signatures. Dans cette figure les tailles des signatures n'ont subi aucun grossissement même si certaines signatures semblent avoir une taille démesurée par rapport à d'autres.

En Amérique du nord, la coutume est d'écrire son nom en guise d'identification. Le nom et parfois le prénom, se présentent alors en général sous une forme relativement lisible (voir figure 5.1). Toutefois, même si les signatures nord-américaines sont proches de l'écriture manuscrite, elles demeurent des signatures par le fait qu'elles constituent un geste hautement appris et répété.

Les signatures européennes sont plutôt des graphismes qui n'ont parfois aucun lien avec le nom de l'individu ou, si subtil qu'il est imperceptible. Par contre, comme l'habitude européenne est d'écrire de gauche à droite, les graphismes ont tendance en règle générale à être exécutés dans le sens gauche-droite. Malgré tout, ceci ne constitue par une règle.

Les signatures chinoises sont des signatures qui pour des européens ou des nord-américains semblent graphiques. Cette impression vient peut être du fait que les caractères chinois sont basés sur des pictogrammes ou des idéogrammes et que les

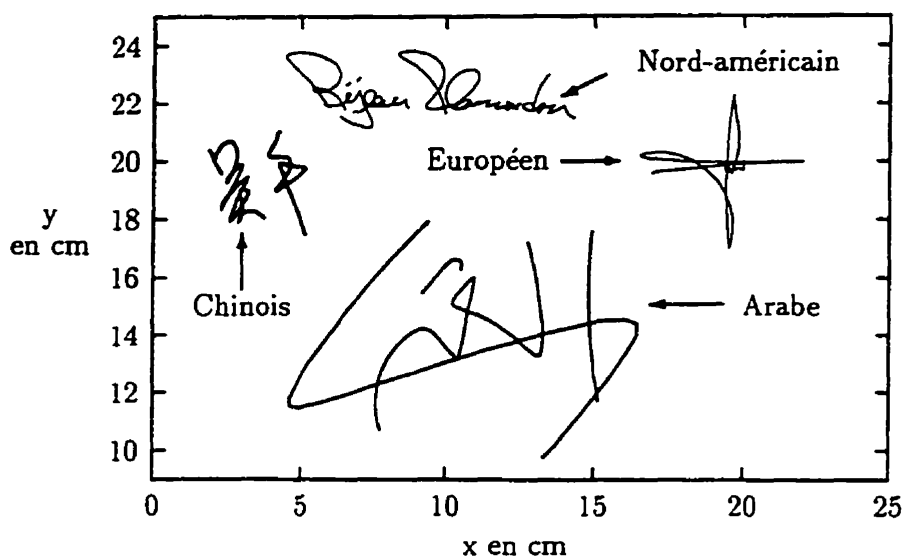


Figure 5.1: Différents types de signatures

chinois (au moins les deux qui ont signé pour cette banque) utilisent les caractères de leur nom pour signer. Néanmoins, ceci leur confère de notre point de vue, un caractère graphique indéniable. Dans notre cas, la distinction majeure avec les signatures européennes et nord-américaine tient dans l'exécution du graphisme de chaque caractère dont la tendance est plutôt dans le sens haut-bas. Ceci n'est pourtant qu'une constatation tirée des deux signataires chinois ayant collaborés pour la constitution de la banque et sur pour laquelle il ne faudrait pas tirer de conclusion générale. Toutefois, pour la validation de la représentation des signatures, on peut considérer les exemplaires chinois de cette banque comme des "*graphismes*" haut-bas.

Avec notre référence culturelle, les signatures arabes nous paraissent également plutôt graphiques. Malgré tout, elles sont basées (semble-t-il) partiellement sur leur alphabet, ce qui peut en faire l'équivalent des signatures nord-américaine, mais c'est sous toute réserve. Par contre, la particularité avec ces signatures, c'est qu'elles sont exécutées dans le sens de leur écriture c'est-à-dire dans le sens droite-gauche.

Tableau 5.1: Répartition des types de signatures

<i>type des signatures</i>	<i>signataires</i>									
arabes	01	14								
chinoises	17	18								
européennes	08	09	10	11	16	19	20	21	22	
nord-américaines	02	03	04	05	06	07	12	13	15	

Finalement, ce qu'il faut réellement retenir de cette banque, c'est que dans celle-ci on trouve des signatures avec des mouvements ayant des tendances gauche-droite, droite-gauche et haut-bas.

La banque de 22 signataires se décompose, pour les différents types de signature, de la manière suivante:

- 9 signatures nord-américaines;
- 9 signatures européennes;
- 2 signatures chinoises;
- 2 signatures arabes.

Le tableau 5.1 identifie les différents signataires par un numéro de 1 à 22. Ce sont ces numéros que l'on va retrouver dans les pages qui suivent pour la validation de la représentation des signatures. Dans cette banque, il faut également noter qu'un des signataires est gaucher, soit le numéro 7. Cette banque est constituée à majorité par des hommes. Une seule femme a signé. Elle est identifiée par le numéro 14.

Enfin, chaque individu a produit 10 signatures dont 5 furent effectuées sur une tablette WACOM¹ (exemplaire 1 à 5) et 5, sur une tablette Pencept² (exemplaire 6 à 10). Le choix d'utiliser 2 tablettes différentes n'est pas lié à la validation de la

¹WACOM SD-510C

²Pencept 300

représentation des signatures. Ce choix est basé sur la perspective de travaux futurs visant à analyser s'il existe une dépendance au type de tablette dans le processus de vérification de signatures.

La banque étant décrite, nous passons maintenant à la description des traitements appliqués à chaque signature.

5.2 Description des traitements

Cette section décrit et résume les différents traitements appliqués à chacune des signatures.

Grâce à une tablette à digitaliser et un logiciel d'acquisition, chaque signature produite par un des 22 signataires est sauvegardée dans un fichier (voir figure 5.2). Dans ce fichier, les coordonnées sont exprimées en unités de tablettes. Chaque unité correspond à 0.0254 mm (1/1000 de pouces). La première étape consiste à transformer les coordonnées en unité de tablette (x_t, y_t) en unité métrique. Compte tenu de la taille des signatures, le centimètre a été retenu comme unité pour exprimer les coordonnées x et y des différentes signatures. Dans ce fichier, nous disposons également de l'information concernant le contact du crayon avec le status (s) de la tablette. Celle-ci permettra d'isoler les différentes composantes³ grâce aussi à l'information de vitesse.

À la deuxième étape, la signature est passée dans un filtre passe-bas ayant une fréquence de coupure proche de 20 Hz (x_f, y_f). Normalement, on considère qu'il n'y a plus d'information concernant la signature au-dessus de 20 Hz [8, 7]. Le filtre passe-bas choisi est un filtre à réponse impulsionnelle infinie (ou récursif) à 12 coefficients de type Tchebychev avec correction de phase. Le choix de ce filtre est basé sur les résultats des travaux de S. St-Laurent [103] portant sur la comparaison des performances de filtres numériques sur des tracés manuscrits.

³rappel: une composante est un tracé délimité par un posé et un levé de crayon

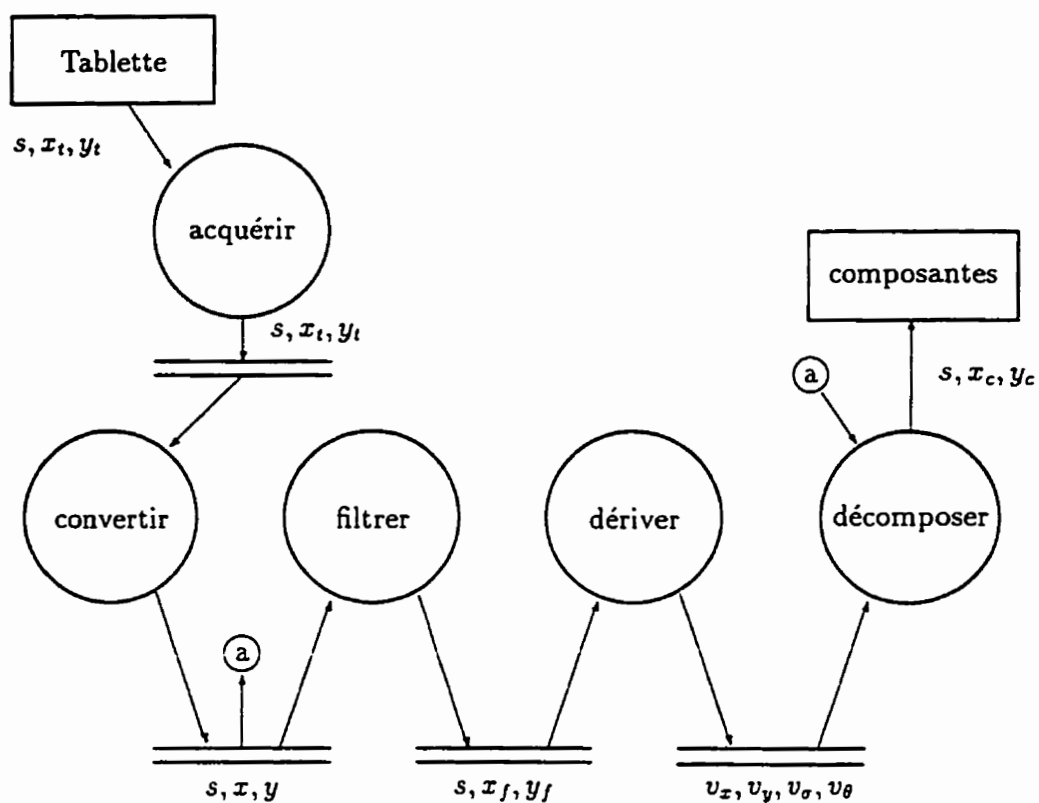


Figure 5.2: Diagramme de flux de données des traitements pour une signature

Cette étape de filtrage est importante pour celle qui va suivre où un filtre dérivatif est utilisé. Le filtre dérivatif comportant l'inconvénient d'amplifier les bruits dans les hautes fréquences, le filtre passe-bas permet d'atténuer l'introduction du bruit engendré par la dérivation des signaux de position. À la troisième étape, le filtre dérivatif permet d'obtenir les différents signaux de vitesse, nécessaires pour l'extraction des paramètres du modèle utilisé dans cette thèse. Toujours basé sur les travaux de St-Laurent [103], la dérivée est effectuée par un filtre à réponse impulsionnelle finie (non-récuratif) à 9 coefficients et à large bande. Ce filtre est associé à une fenêtre de Tchebychef ayant une fréquence de coupure de 46 Hz. La description complète de ce filtre se trouve dans la référence [103]. À partir de la dérivée numérique par rapport au temps des signaux de position $x(t)$ et $y(t)$, on peut alors calculer la vitesse curviligne par la relation (5.1). Ensuite, par une seconde dérivation des signaux de position, on peut calculer la vitesse angulaire pour chaque point du tracé manuscrit par la relation (5.2). Dans les relations (5.1) et 5.2 \dot{x} et \dot{y} représentent respectivement les dérivées premières de x et y et, \ddot{x} et \ddot{y} les dérivées secondes.

$$v_\sigma = \|\vec{v}\| = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \quad (5.1)$$

$$v_\theta = \frac{\ddot{y}\dot{x} - \dot{y}\ddot{x}}{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = \frac{\ddot{y}\dot{x} - \dot{y}\ddot{x}}{v_\sigma^2} \quad (5.2)$$

Après ces différents traitements, la signature est segmentée en composantes. La validation de la représentation des signatures ne fera pas intervenir les levés de crayon. Ce choix a été fait à cause de la nature instable de celles-ci. De plus, le matériel utilisé n'a pas été conçu pour suivre parfaitement le mouvement du crayon lorsque celui-ci n'est plus en contact avec sa surface. Malgré tout celui-ci enregistre encore le mouvement du crayon à l'intérieur d'une certaine distance (la limite de proximité) par rapport à la surface de la tablette. Pour analyser correctement ces tracés hors contact de la tablette mais dans les limites de proximité, il faudrait disposer d'une

coordonnée z indiquant la distance par rapport au plan de la tablette. Cette valeur est non disponible avec le matériel utilisé. Par conséquent, même si le modèle delta lognormal vectoriel permet de traiter des mouvements dans l'espace, la validation sera effectuée uniquement sur les tracés en contact avec la surface de la tablette (mouvements plan à 2 dimensions). L'information de contact avec la surface de la tablette contenu dans le status s transmis par la tablette servira à délimiter les différentes portions de tracés manuscrits qui seront traitées.

La composante, qui servira à la validation de la représentation, devra donc correspondre à un tracé manuscrit, morceau de signature, pour lequel le crayon est en contact avec la tablette. Une contrainte supplémentaire a été ajoutée. Compte tenu du modèle utilisé, basé sur des profils de vitesse de type delta lognormal, une composante devra contenir un pic entier dans le domaine des vitesses curvilignes (parties montante et descendante).

Ainsi, les pics incomplets, généralement au début (positionnement du crayon) et à la fin d'une signature (retrait du crayon) ne seront pas traités. De plus, si un levé de crayon apparaît à l'intérieur d'un pic, celui-ci ne sera pas traitée.

Par conséquent, la validation de la représentation des signatures sur la banque de cette thèse se fera uniquement sur les composantes qui contiennent des pics de vitesse curviligne complets. Tout tracé qui ne respectera pas ces deux conditions — contact avec la tablette et pic complet — sera considéré comme un levé de crayon. Le tableau 5.2 donne les pourcentages que représentent la durée des composantes ainsi retenues par rapport à la durée de la signature complète, pour chaque signataire et chaque exemplaire de la banque de signatures. Comme on peut le constater dans ce tableau, dans certains cas 100 % de la signature est traitée (individus 19 et 21). Donc, certaines signatures sont constituées d'une seule composante. Le plus bas pourcentage de composantes à l'intérieur d'une signature est de 43.8 % pour l'exemplaire 2 de l'individu 9. Mais en moyenne pour ce signataire 71.9 % de sa signature sera traité. La pression exercée sur le crayon par ce dernier signataire semble instable et à pour

Tableau 5.2: Pourcentage des composantes dans les signatures

<i>indiv.</i>	<i>Pourcentage de composantes</i>										<i>moy.</i>
01	82.9	79.0	76.2	76.7	81.6	86.0	86.3	85.4	84.0	85.7	82.4
02	71.0	67.9	64.6	75.7	70.4	52.1	73.1	69.5	75.8	74.2	69.5
03	73.1	77.1	81.8	84.2	80.6	79.6	70.9	73.9	75.1	64.0	76.1
04	76.5	72.9	75.3	74.1	74.0	69.4	70.5	69.2	72.2	70.3	72.5
05	69.8	67.6	65.1	63.0	58.9	67.6	60.8	65.8	68.4	60.9	64.8
06	56.1	63.2	62.9	55.8	63.3	61.5	63.8	56.5	59.6	62.1	60.5
07	80.8	77.7	79.3	81.2	84.6	83.8	83.2	83.2	83.7	80.3	81.8
08	89.6	88.2	85.7	82.8	89.6	88.1	93.4	80.4	89.8	90.6	87.9
09	62.3	43.8	73.6	64.3	74.0	81.9	77.5	79.7	82.3	79.1	71.9
10	79.4	76.5	76.2	77.9	81.3	77.7	76.0	78.8	76.0	76.0	77.6
11	89.6	92.3	94.4	86.5	92.2	92.0	90.7	92.2	87.3	87.4	90.5
12	80.5	72.6	72.1	73.4	70.3	69.3	70.4	69.4	69.3	66.1	71.4
13	80.7	81.1	78.6	81.1	80.2	84.1	85.4	81.7	86.6	79.4	81.9
14	76.9	87.6	61.5	70.4	70.8	65.1	69.4	69.1	75.6	71.5	71.8
15	71.4	78.5	71.4	77.8	68.2	68.8	68.0	60.7	74.2	60.9	70.0
16	91.8	98.9	92.7	97.7	97.8	92.3	90.9	87.9	95.9	97.1	94.3
17	73.9	87.8	100.0	97.9	91.3	93.9	87.3	97.1	90.6	100.0	92.0
18	86.5	86.8	84.8	87.4	90.9	84.4	79.1	74.7	82.3	59.4	81.7
19	96.1	100.0	100.0	94.5	89.8	100.0	85.2	97.2	96.2	100.0	95.9
20	86.4	81.7	86.6	87.1	80.0	75.9	75.8	77.0	72.2	75.6	79.9
21	92.8	92.6	97.7	100.0	100.0	92.4	100.0	99.1	92.9	100.0	96.8
22	96.9	95.5	98.7	98.7	98.5	97.5	95.8	96.8	95.4	95.5	97.0

conséquence d'introduire des levés de crayon erratiques.

La dernière colonne du tableau donne la moyenne pour chaque signataire. Ces valeurs moyennes vont de 60.5 % à 97 %. Ces pourcentages devraient être tout à fait acceptables pour la validation de la représentation des signatures.

Après la décomposition⁴ des signatures, l'extraction des paramètres statique et dynamique peut être réalisée. Ces différents traitements ont été décrits au chapitre précédent.

5.3 Extraction des paramètres

Avant de valider la représentation des signatures par le modèle delta lognormal vectoriel, il faut extraire tous les paramètres sur les différentes composantes des 220 signatures. Cette extraction est réalisée d'une manière entièrement automatique. Elle consiste à faire une extraction des caractéristiques statiques de la signature pour chaque composante du tracé de la signature. Ensuite, avec la méthode décrite dans le chapitre précédent à la section 4.3.5 page 109, la cinématique est également extraite.

Le tableau 5.3 donne les moyennes des EQM qui résultent de cette extraction des paramètres pour les 22 signataires. La colonne de l'extrême gauche identifie le signataire tandis que les autres colonnes donnent les moyennes des Erreur Quadratique Moyenne (EQM) calculée à partir des 10 exemplaires de signatures. Pour l'image de la signature (la statique), l' EQM_I a été calculée à partir de l'équation (5.3), où $(x_i^o; y_i^o)$ désigne les coordonnées d'un point original de la signature et $(x_i^s; y_i^s)$ ceux du point synthétique correspondant. En annexe E, on trouvera le détail des Erreurs Quadratiques Moyennes sur la position, les vitesses curviligne et angulaire pour chaque exemplaire de chacun des signataires. Pour les vitesses, l' EQM_V est calculée à partir de la relation (5.4) où v_i^o désigne la vitesse d'un point de la signature originale et v_i^s la vitesse du point synthétique correspondant.

⁴Cette décomposition est une forme de segmentation que l'on retrouve dans le premier niveau des traitements dans la référence [70].

Tableau 5.3: *EQM* moyennes sur l'image et les profils v_σ et v_θ des 22 signataires

<i>indiv.</i>	<i>image</i>	v_σ	v_θ
01	0.0237	12.85	17933.10
02	0.0047	1.29	9711.82
03	0.0186	7.72	10192.41
04	0.0396	10.00	35635.38
05	0.0115	6.44	81391.23
06	0.0117	7.13	94676.13
07	0.0063	1.25	13325.66
08	0.0175	2.64	15841.59
09	0.0318	17.77	47962.06
10	0.1491	30.12	32447.49
11	0.1512	55.59	19559.50
12	0.0501	11.79	15758.83
13	0.0410	5.95	6326.53
14	0.3096	99.88	11169.32
15	0.0240	12.73	39884.24
16	0.2455	36.96	936.98
17	0.0944	15.71	17182.09
18	0.1960	24.98	8760.97
19	0.1449	28.12	14242.74
20	0.0559	20.46	9702.16
21	0.2777	50.33	97586.55
22	0.1341	29.67	7752.14
<i>moy. totale</i>	0.0926	22.24	27635.40

$$EQM_I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^o - x_i^s)^2 + (y_i^o - y_i^s)^2 \quad (5.3)$$

$$EQM_V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i^o - v_i^s)^2 \quad (5.4)$$

Les erreurs plus ou moins importantes que l'on obtient par cette extraction automatique — celles sur l'image de la signature — seront expliquées un peu plus loin dans cette thèse. Elles sont liées aux choix d'implantation du modèle delta lognormal vectoriel pour la mise en œuvre de la représentation des signatures. Par contre, les erreurs très importantes sur les signaux v_θ sont "normales". Dans ces signaux, il existe des pics — dus aux discontinuités angulaires — de très fortes amplitudes. Compte tenu de la pente très importante de la portion de courbe relative à ces pics, un petit écart en abscisse avec le point synthétique correspondant entraîne une différence en ordonnée ($v_i^o - v_i^s$) très grande. Élevée ensuite au carré, on obtient alors des EQM_{v_θ} très importantes. Néanmoins, comme la vitesse curviligne correspondante est très faible, ces erreurs ont peu de conséquence sur la reconstruction des tracés.

5.4 Protocole de la validation de la représentation

Pour valider la représentation des signatures, un système de vérification de signatures sera utilisé compte tenu du nombre relativement important de signatures à traiter. En fait, pour quantifier ce nombre, nous avons 220 images de signature originale à comparer avec 220 images de signature modélisée (ou synthétique). Nous avons ensuite 220 signaux de vitesse curviligne à comparer avec 220 signaux synthétiques, plus 220 signaux de vitesse angulaire originaux à comparer avec 220 synthétiques, soit un total de 660 signaux ou profils originaux à comparer avec 660 synthétiques, donc 1 320 courbes à examiner.

Le système de vérification dynamique de signatures (VDS) permettra de réaliser

l'analyse des signaux de manière automatique.

5.4.1 Le système VDS

Le système VDS, breveté par R. Plamondon [67, 69, 90, 76], est conçu pour vérifier l'identité d'une personne à partir d'un abonnement réalisé avec 3 signatures de référence. Le texte qui suit — tiré de l'article [90] — donne une description plus précise du processus de vérification utilisé par VDS.

Globalement, la vérification de signatures est réalisée par trois niveaux distincts. Un premier niveau calcule une distance pondérée entre des paramètres dynamiques des signatures tests et de références. Le second niveau calcule une corrélation régionale intrinsèque entre des portions du signal de vitesse de la signature test avec les portions correspondantes de la vitesse de la signature de référence. Le troisième niveau de vérification consiste à calculer des distances entre les images des trajectoires des signatures tests et de références par un appariement élastique de formes. Ces niveaux de vérification sont liés à un ensemble de fonction coût (F_i) basées sur des exponentielles, des facteurs d'accroissement et des constantes de décalage. Les décisions sont prises à partir de valeurs seuils qui sont personnalisées et sont calculées automatiquement à partir des trois signatures de références.

Plus précisément au premier niveau, le système calcule un coût C_1 donné par la relation (5.5).

$$C_1 = \sum_{i=1}^N P_{1i} F_{1i}(d_{1i}) \quad (5.5)$$

où P_{1i} , F_{1i} et d_{1i} sont respectivement le poids, la fonction coût et la distance associée à chacun des N paramètres dynamiques.

Au second niveau, la corrélation régionale intrinsèque est calculée pour les vitesses curvilignes (V_σ) et angulaires (V_θ) entre les signatures tests et de références. Une seconde valeur coût est calculée par la relation (5.6).

$$C_2 = \sum_{i=1}^2 P_{2i} F_{2i}(d_{2i}) \quad (5.6)$$

où P_{2i} , F_{2i} et d_{2i} sont respectivement le poids, la fonction coût et la corrélation associée avec chaque signal V_σ et V_θ . Pour calculer ces corrélations régionales intrinsèques, les marques temporelles qui délimitent chaque signature en segment de base (chaînes et composantes) sont en premier lieu synchronisées. Ce couplage est basé sur l'appariement élastique de formes. Il autorise des expansions des composantes de courtes de durée et la concaténation de chaînes qui ne sont pas partagées par les deux signatures.

Finalement le troisième niveau de vérification est basé sur le calcul de la variation simultanées des abscisses et des ordonnées des signatures tests et de références pour chaque paire de chaînes significatives extraites du processus de synchronisation précédent. Ceci est réalisé en calculant une troisième valeur de coût C_3 données par la relation (5.7).

$$C_3 = F_3(d_3) \quad (5.7)$$

où F_3 et d_3 sont respectivement la fonction coût et la distance résiduelle minimum calculée par l'appariement élastique local des trajectoires cartésiennes.

Les trois niveaux de vérification peuvent ensuite être combinés de différentes manières pour construire un système spécifique. La décision est ensuite basée sur une valeur de seuil personnalisée, déterminée à partir des signatures de références. La détermination automatique de ces seuils personnalisés est basée sur le pire résultat de vérification obtenu en comparant les signatures de références entre elles, prises deux à deux. Ceci autorise une adaptation de la fonction discriminante en respect avec la stabilité des signatures de références qui sont fournies.

En résumé, il existe trois étapes importantes dans le processus de vérification d'une signature test pour que le système décide d'accepter ou de rejeter celle-ci (il existe

aussi la possibilité d'une réponse incertaine). Dans la première étape, le système VDS adopte une approche basée sur la comparaison de paramètres afin d'éliminer rapidement les signatures inacceptables. Il prend quelques mesures sur la signature qu'il compare à celles en référence afin de prendre une décision. Si cette étape est franchie avec succès, VDS aborde la deuxième étape où la similarité de la cinématique des signatures (les profils de vitesse) sera évaluée. À la troisième étape, VDS compare finalement la statique de la signature (l'image) si à l'étape précédente, la signature a été acceptée.

Dans sa décision finale, VDS calcule une valeur basée sur la somme pondérée des scores obtenus à chaque étape (paramétrique, dynamique, statique). Cette pondération qualifiée de *finale* permet à VDS de décider en fonction d'un seuil d'accepter ou de refuser la signature. Celle-ci permet aussi de rendre le système adaptable à différentes situations. Ainsi, il est possible de mettre l'emphase au moment de la décision sur les comparaisons paramétrique, dynamique ou statique en jouant sur les coefficients de pondération. Ce côté adaptable sera pris en compte lors de la validation des différents aspects de la représentation d'une signature, soit entre autres, la statique et la dynamique d'un tracé.

Par conséquent, quatre simulations distinctes seront réalisées. Dans la première, on retiendra les pondérations par défaut du système VDS⁵ (*pondération finale par défaut*). Dans la deuxième, seule la comparaison paramétrique permettant à VDS de prendre une décision sera retenue (*pondération finale paramétrique*). À la troisième simulation, seule la dynamique sera prise en considération (*pondération finale dynamique*). Enfin, c'est à la quatrième que sera testée la statique (l'image) de notre représentation des signatures (*pondération finale statique*). Le tableau 5.4 donne un résumé des différentes *pondérations finales* utilisées. Par ces quatre simulations, on pourra porter un jugement quantitatif sur la capacité de notre représentation de

⁵Cette pondération a été obtenue dans le contexte d'un concours d'imitation [90] et donc elle n'est pas nécessairement optimale par rapport aux tests planifiés dans cette thèse. De plus il n'était pas du ressort de celle-ci de faire l'optimisation de VDS dans le cadre de ces expériences.

Tableau 5.4: Pondérations utilisées pour produire les résultats

<i>type de pondération finale</i>	<i>Pondérations</i>		
	<i>paramétrique</i>	<i>dynamique</i>	<i>statique</i>
par défaut	0.1	0.6	0.3
paramétrique	1.0	0.0	0.0
dynamique	0.0	1.0	0.0
statique	0.0	0.0	1.0

reproduire la dynamique, la statique et la globalité des signatures.

5.4.2 Abonnement au système VDS

Il faut trois signatures au système VDS pour abonner un usager (signataire), afin que celui-ci puisse calculer des seuils personnalisés. Dans une procédure normale, l'usager est invité à signer et ses 3 premières signatures sont utilisées comme référence (procédure d'abonnement de l'usager). Par conséquent, dans le cadre de cette thèse, les 3 premières signatures données par l'usager vont également être prises pour l'abonnement. Ces 3 premières signatures correspondent à 3 exemplaires enregistrés sur la tablette WACOM. Une autre procédure d'abonnement a été ajoutée pour la validation des résultats. Disposant d'exemplaires enregistrés par 2 tablettes différentes, un abonnement par tablette a également été considéré. Nous retrouvons donc ainsi dans le protocole de validation:

- 1 abonnement avec les exemplaires 1, 2 et 3;
- 2 abonnements, soit un pour chaque tablette, avec les exemplaires 1, 2 et 3 pour la tablette WACOM et 6, 7 et 8 pour la tablette PENCEPT.

Le but étant de valider notre représentation des signatures, pas de calculer les taux d'acceptation du système de vérification de signatures VDS, la multiplication des abonnements (1 au lieu de 2) constitue une manière de favoriser les acceptations de

signatures originales. Ainsi, les signatures d'abonnement devant normalement être acceptées si elles sont de nouveau présentées au système, on augmente les chances de voir un spécimen synthétique accepté provenant d'un original accepté par VDS. Car si le système VDS refuse la signature originale on peut s'attendre à ce qu'il rejette la signature synthétique, ce qui ne permettrait pas de tirer de conclusion sur la validité de la représentation des signatures. Donc, il est préférable de favoriser l'acceptation des signatures originales avec 2 abonnements (1 par tablette) même si les taux d'acceptation de VDS (erreur de type I) perdent de leur signification.

5.4.3 Résultats avec le système VDS

Le système VDS donne 3 types de résultats, soit: *accepté*, *refusé* et *incertain*. Dans cette thèse, la validation consistera à:

- abonner un usager (individu 1 à 22) selon l'un des deux protocoles présenté précédemment;
- vérifier l'authenticité des 10 exemplaires de la signature de l'usager avec le système VDS;
- vérifier les 10 exemplaires synthétiques basés sur les 10 originaux avec le système VDS.

Pour présenter les résultats, les dénominations suivantes seront utilisées: aa, rr, ii, ar, ra, ai, ia, ri et ir. La lettre de gauche indique, pour chacun des couples précédents, le résultat du système VDS sur un exemplaire original avec: "a" pour *accepté*, "r" pour *refusé* et "i" pour *incertain*. La lettre de droite indique le résultat pour l'exemplaire synthétique correspondant avec la même signification pour les lettres. Ainsi "aa" indique que VDS a accepté la signature originale et la synthétique, tandis que "ar" signifie qu'il a accepté l'originale mais rejeté la synthétique.

Le système VDS prend en compte tout le tracé de la signature y compris les levés de crayon, si ils existent. Comme dans cette thèse nous ne modélisons pas les levés de crayon, deux approches ont été envisagées pour valider la représentation des signatures:

- l'approche par composantes;
- l'approche par signatures complètes.

Les deux sections suivantes vont détailler les résultats obtenus avec les approches par composantes et par signatures complètes et ceci, en fonction des deux différents abonnements (1 ou 2 abonnements) qui ont été considérés.

5.5 Résultats de la validation de la représentation

5.5.1 Validation sur les composantes

Dans l'approche par composantes, tous les levés de crayon (dans le sens adopté par cette thèse) ont été supprimés. Les différentes composantes ont été juxtaposées temporellement pour former une pseudo-signature composée uniquement de tracés avec une représentation.

Dans ce cas, l'abonnement par le système VDS se fera uniquement sur ce qui a été modélisé. Ainsi, il va être possible d'analyser la signature originale, amputée des levés de crayon, et la signature synthétique, issue de celle-ci. Dans cette approche, on valide la totalité de la représentation puisque la signature modélisée est 100 % synthétique. Cette approche comporte toutefois un inconvénient. La détection par les tablettes des levés de crayon n'étant pas fiable, ces derniers peuvent se produire aléatoirement à différents endroits de la signature. La concaténation des composantes d'un même signataire pour des exemplaires différents peut alors donner des signatures résultantes assez dissemblables, ce qui peut pénaliser les taux d'acceptation par VDS (qui se synchronise sur les composantes).

Tableau 5.5: Résultats pour les composantes avec un seul abonnement

<i>Pondération finale</i>	aa	rr	ii	ar	ra	ai	ia	ri	ir
par défaut	98	66	1	36	16	2	0	1	0
paramétrique	101	64	0	31	14	4	0	3	3
dynamique	92	66	3	34	16	5	0	1	3
statique	103	66	2	32	14	1	0	2	0

Tableau 5.6: Résultats pour les composantes avec deux abonnements

<i>Pondération finale</i>	aa	rr	ii	ar	ra	ai	ia	ri	ir
par défaut	112	51	0	44	10	3	0	0	0
paramétrique	110	51	0	42	10	6	1	0	0
dynamique	108	51	0	45	10	6	0	0	0
statique	114	51	0	43	10	1	1	0	0

Tableau 5.7: Taux d'acceptation pour les composantes

<i>Pondération finale</i>	<i>1 abonnement</i>	<i>2 abonnements</i>
par défaut	83.8 (61.8) %	76.7 (72.3) %
paramétrique	84.6 (61.8) %	76.5 (71.8) %
dynamique	82.4 (59.5) %	74.2 (72.3) %
statique	86.0 (61.8) %	79.1 (71.8) %

Les tableaux 5.5 et 5.6 donnent les résultats obtenus respectivement avec un abonnement ou deux, tout en considérant les 4 pondérations finales présentées précédemment (voir tableau 5.4).

Le tableau 5.7 résume les résultats des tableaux 5.5 et 5.6 en donnant le rapport du nombre des signatures synthétiques acceptées divisé par les originaux acceptés, exprimé en pourcentage (voir équation 5.8). Dans ce même tableau, on a ajouté entre parenthèses les taux d'acceptation par VDS.

$$\% = \frac{aa + ra + ia}{aa + ar + ai} \times 100 \quad (5.8)$$

Dans le tableau 5.7, on constate une dégradation des résultats de 7 à 8 % entre

la méthode à un et à deux abonnements et ceci, pour les différentes pondérations. Cette dégradation des résultats peut probablement s'expliquer par un resserrement des seuils personnalisés avec la procédure à deux abonnements. Ainsi, avec des seuils de tolérance plus étroits, les signatures synthétiques sont moins acceptées par le système VDS. Par contre, l'augmentation des taux d'acceptation du système VDS était prévisible à cause du double abonnement, puisque la proportion des signatures d'abonnement a augmenté (3 sur 5 au lieu de 3 sur 10). Mais une fois encore, nous soulignons que l'on ne recherche pas à évaluer le système VDS, mais à valider la représentation des signatures.

Dans le tableau 5.7, différents résultats sont à considérer. Premièrement, on constate que les taux d'acceptation de VDS sur les composantes de la banque sont assez bas: environ 61 % pour 1 abonnement et 72 % pour 2 abonnements (voir valeurs entre parenthèses). De savoir que VDS est très sélectif dans le cas des composantes permet de mieux apprécier les résultats, car si VDS est sélectif pour les originaux, il l'est aussi pour les signatures synthétiques. Donc, si on analyse les résultats sous cette perspective et que l'on considère les signatures synthétiques comme une autre banque à part entière de nos 22 signataires, alors les résultats donnés dans les tableaux 5.5 et 5.11 sont sous-estimés et ne représentent que 61 % ou 72 % de la réalité.

Deuxièmement, il est important de noter que l'approche paramètre (niveau 1 de vérification) limite les résultats de la dynamique et de la statique. Comme il a été dit précédemment, une signature peut-être rejetée dès le premier niveau. Si celle-ci est rejetée, elle ne pourra pas être vérifiée pour sa dynamique ou sa statique même si les pondérations sont mises en conséquence. Donc, les taux obtenus par la vérification paramétrique limitent les taux obtenus pour la statique et la dynamique (voir tableau 5.7). Toutefois, dans le cas de 2 abonnements, on constate que pour les taux d'acceptation donnés par VDS, l'approche dynamique avec 72.3% donne des résultats supérieurs à l'approche paramétrique (71.8). Ces résultats sont normaux. Ils sont dus aux signatures incertaines qui passent le premier niveau et qui selon

la pondération, peuvent être ensuite acceptées en dynamique ou en statique. Les signatures incertaines n'étant pas comptabilisées dans les taux d'acceptation, elles expliquent cette augmentation du taux que l'on peut observer. Comme les réponses "incertaines" de VDS sont rares, l'augmentation des taux ne peut être que très minime et par conséquent, les taux obtenus au premier niveau constituent la limite quasi-maximale atteignable, à quelques pour-cents près.

Si l'on prend en considération la remarque précédente, on peut donc déduire du tableau 5.7, que toutes les signatures acceptées au niveau paramètre sont presque toutes acceptées au niveau dynamique (il existe une légère diminution). Par contre, toutes les signatures sont acceptées au niveau de la statique après avoir été acceptées au niveau précédent. Pour quantifier l'acceptation spécifiquement aux différents niveaux, une autre analyse a été effectuée avec une version modifiée de VDS (réalisée spécialement à cette fin) qui permet d'accéder à un des niveaux de vérification (paramètres, statique, dynamique) sans avoir à franchir les niveaux précédents. Ces résultats sont présentés aux tableaux 5.8, 5.9 et 5.10 et portent tous l'annotation *bis* pour les distinguer des résultats obtenus avec la version originale de VDS. Dans ces différents tableaux, on qualifiera maintenant de *spécifique* le type de pondération adopté. Les types de pondération étant maintenant spécifiques, la pondération par défaut n'a plus d'objet dans ces tableaux.

Ces résultats confirment bien ce qui a été observé précédemment. En résumé, on peut conclure que les signatures synthétiques sont largement acceptées par VDS du point de vue statique (environ 100%) et très bien en ce qui concerne la dynamique (86% à 90%). Ils contribuent à valider notre représentation des signatures dont le but est de reproduire à la fois la dynamique et la statique.

Dans le tableau 5.10, il est intéressant de voir un rapport de 90 % entre les signatures synthétiques et originales acceptées dans le cas de la dynamique (86 % pour 2 abonnements). Pour la statique, ce taux est proche de 100 % (1 abonnement ou 2 abonnements). Il dépasse même 100 % dans le cas de 1 abonnement. Ceci veut

Tableau 5.8: Résultats pour les composantes avec 1 abonnement (*bis*)

<i>Pondération spécifique</i>	aa	rr	ii	ar	ra	ai	ia	ri	ir
paramétrique	106	61	0	26	12	6	1	6	2
dynamique	137	25	5	25	11	8	5	1	3
statique	198	11	4	0	2	2	2	1	0

Tableau 5.9: Résultats pour les composantes avec 2 abonnements (*bis*)

<i>Pondération spécifique</i>	aa	rr	ii	ar	ra	ai	ia	ri	ir
paramétrique	114	48	2	35	8	12	0	1	0
dynamique	151	18	0	26	10	13	2	0	0
statique	209	4	0	2	1	2	2	0	0

Tableau 5.10: Taux d'acceptation pour les composantes (*bis*)

<i>Pondération spécifique</i>	<i>1 abonnement</i>	<i>2 abonnements</i>
paramétrique	86.2 (62.7) %	75.8 (73.2) %
dynamique	90.0 (77.3) %	85.8 (86.4) %
statique	101.0 (90.9) %	99.5 (96.8) %

dire que VDS accepte plus de signatures synthétiques (2 de plus) que d'originaux, ce qui n'est pas pour être en défaveur de notre représentation des signatures. La figure 5.3 montre une des signatures synthétiques acceptées dont l'original a été refusé avec à côté les signatures de référence originales ayant servi à l'abonnement. Les tailles des signatures sont respectées. La signature originale qui a été refusée est présentée dans la figure 5.4 avec la signature synthétique. Cette figure permet ainsi de les comparer.

Donc, pour l'instant notre représentation des signatures semblent être valide. Mais à cause de la réserve émise sur l'utilisation des composantes dans VDS, l'analyse est reprise dans la section suivante avec les signatures complètes, en ajoutant les levés de crayon qui n'ont pas été traités.

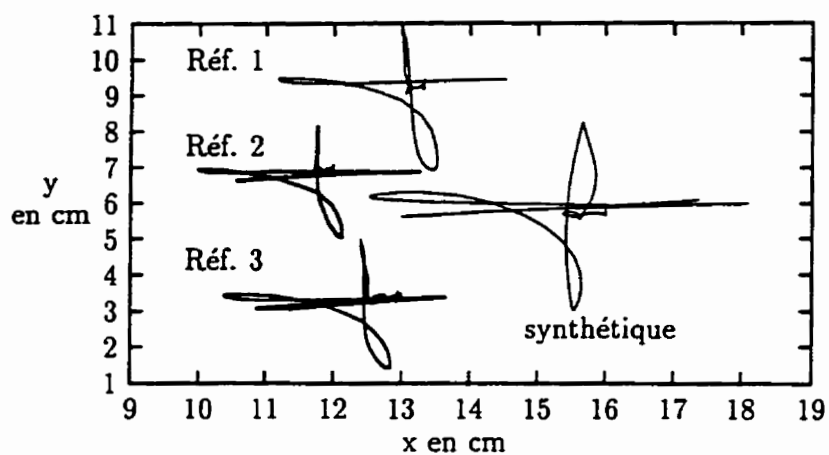


Figure 5.3: Signature synthétique acceptée avec les références

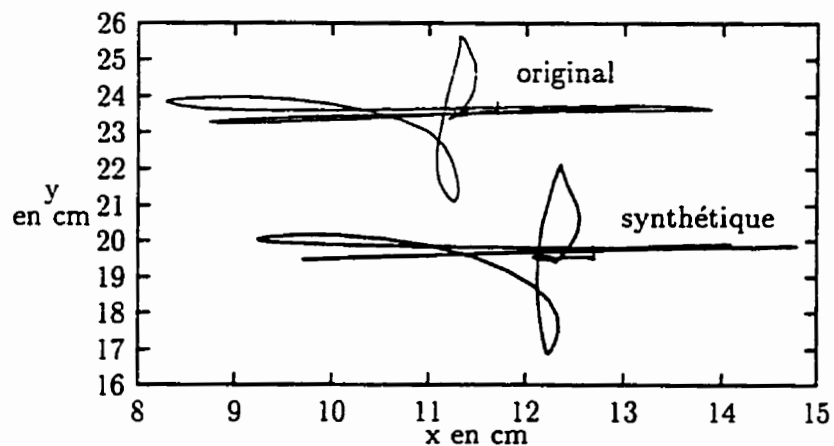


Figure 5.4: Signature originale refusée avec la signature synthétique acceptée

Tableau 5.11: Résultats pour les signatures complètes avec 1 abonnement

<i>Pondération finale</i>	aa	rr	ii	ar	ra	ai	ia	ri	ir
par défaut	110	78	1	15	9	4	0	1	2
paramétrique	119	72	0	10	12	4	0	0	3
dynamique	104	78	2	19	9	2	2	3	1
statique	116	82	0	8	7	2	1	3	1

Tableau 5.12: Résultats pour les signatures complètes avec 2 abonnements

<i>Pondération finale</i>	aa	rr	ii	ar	ra	ai	ia	ri	ir
par défaut	171	26	1	12	7	3	0	0	0
paramétrique	169	26	0	12	5	8	0	0	0
dynamique	166	27	1	14	7	3	0	0	2
statique	178	26	0	11	5	0	0	0	0

5.5.2 Validation sur les signatures complètes

Dans cette analyse, les levés de crayon qui n'ont pas été modélisés sont réinsérés à leur place entre les différentes composantes. Ceci permet d'être plus proche des conditions d'utilisation de VDS où normalement dans la plupart des signatures, il existe des levés de crayon. D'ailleurs, VDS en tient compte lorsqu'elles existent, surtout au niveau de l'analyse des paramètres et de la synchronisation des signaux de vitesse. Il faut remarquer que l'ajout des levés de crayon dans les tracés synthétiques peut occasionner des discontinuités. Mais normalement, les tracés synthétiques doivent finir sur la dernière cible virtuelle qui correspond au dernier point du tracé original. Par conséquent, si la signature synthétique est bien modélisée, sa génération ne doit pas entraîner de discontinuité à la jonction des composantes avec les levés de crayons qui ont été réinsérés. Donc, si la signature synthétique est mauvaise, elle devrait être rejetée par le système VDS à cause des discontinuités. Les tableaux 5.11, 5.12 et 5.13 donnent les résultats obtenus avec le même protocole que précédemment avec la version originale de VDS.

Là encore, les taux d'acceptation de VDS sont encore bas, autour de 60 % dans le cas d'un seul abonnement. Ce faible taux s'explique par le fait que l'abonnement

Tableau 5.13: Taux d'acceptation pour les signatures complètes

<i>Pondération finale</i>	<i>1 abonnement</i>	<i>2 abonnements</i>
par défaut	92.2 (58.6) %	95.7 (84.5) %
paramétrique	98.5 (60.5) %	92.2 (85.9) %
dynamique	92.0 (56.8) %	94.5 (83.2) %
statique	98.4 (57.3) %	96.9 (85.9) %

est réalisé avec des exemplaires provenant de la tablette WACOM et que beaucoup d'exemplaires rejetés proviennent de la tablette Pencept. Cette constatation est confirmée par les taux obtenus avec deux abonnements, ou les taux d'acceptation grimpent à 85 % environ. Par conséquent, il existe une dépendance du système VDS envers les tablettes au moment de l'abonnement.

Par contre par rapport à la validation sur les composantes, les résultats obtenus avec les signatures entières sont nettement meilleurs. Ainsi avec la pondération par défaut, on peut constater un rapport de 95.7 % entre les signatures synthétiques et originales acceptées. Ceci veut dire que dans des conditions normales d'utilisation de VDS, on obtiendrait sensiblement les mêmes résultats avec des signatures originales et des signatures synthétiques.

De même, si l'on considère l'analyse individuelle avec la version modifiée de VDS (annotation *bis*) pour les niveaux paramètres, dynamique et statique (voir tableau 5.14, 5.15 et 5.16), on constate des taux de 99.4 % (91.5 % pour 2 abonnements) au niveau des paramètres. Ceci montre entre autre que l'introduction des levés de crayon est importante car ils font partie du processus de vérification et que la juxtaposition des composantes — réalisée dans l'analyse précédente — pénalise la validation de la représentation des signatures.

Par contre, il faut également remarquer que ce n'est pas l'introduction des levés de crayon que l'on doit tenir comme responsable des bons résultats, car dans la plupart des cas, il représente une faible part de la signature (voir tableau 5.2). L'effet obtenu est plutôt de s'approcher des performances réelles du système VDS en lui fournissant

Tableau 5.14: Résultats pour les signatures complètes avec 1 abonnement (*bis*)

<i>Pondération spécifique</i>	aa	rr	ii	ar	ra	ai	ia	ri	ir
paramétrique	161	30	2	7	4	5	7	1	3
dynamique	145	19	4	26	7	5	3	7	4
statique	151	50	0	2	3	5	3	3	3

Tableau 5.15: Résultats pour les signatures complètes avec 2 abonnements (*bis*)

<i>Pondération spécifique</i>	aa	rr	ii	ar	ra	ai	ia	ri	ir
paramétrique	180	22	0	9	0	8	0	0	1
dynamique	185	7	1	12	7	6	0	0	2
statique	214	3	0	1	1	1	0	0	0

Tableau 5.16: Taux d'acceptation pour les signatures complètes (*bis*)

<i>Pondération spécifique</i>	<i>1 abonnement</i>	<i>2 abonnements</i>
paramètre	99.4 (78.6) %	91.4 (83.5) %
dynamique	88.1 (80.0) %	94.6 (92.3) %
statique	99.4 (71.8) %	99.5 (98.2) %

des “vraies signatures” au lieu d’une concaténation de composantes manuscrites tirées d’une signature originale.

Les tableaux précédents présentent ce que l’on appelle dans le domaine de la vérification de signatures, les erreurs de type I. Une erreur de type I est un refus d’une signature originale. Pour évaluer un système de vérification de signatures on donne généralement aussi les erreurs de type II. Une erreur de type I est une acceptation d’une fausse signature. Dans la section qui suit, nous allons donner les erreurs de type II sur des faux aléatoires pour compléter la validation de la représentation.

5.5.3 Validation avec les faux aléatoires

Pour la validation avec les faux aléatoires, nous allons considérer les signatures complètes. Pour un signataire donné, les faux aléatoires seront constitués par tous les autres signataires de la banque. Par conséquent pour un signataire nous avons 105 faux aléatoires ($1 \times 21 \times 5$) par abonnement (WACOM ou PENCEPT) soit pour les 22 signataires et les deux tablettes 4620 faux aléatoires au total (2310 par tablette).

La validation avec les faux aléatoires n’a pas comme objectif d’évaluer le système de vérification de signatures VDS⁶. Son but est de poursuivre la validation de la représentation. Dans ce sens, quels que soient les résultats obtenus avec VDS, ce qui est important c’est de comparer les résultats obtenus entre les *faux aléatoires originaux* et les *faux aléatoires synthétiques*. Le tableau 5.17 donne les résultats obtenus par abonnement (tablettes WACOM et PENCEPT) pour différentes pondérations. Les pondérations sont les mêmes que pour la validation précédente avec les erreurs de type I.

Comme le montre le tableau 5.17, les taux d’erreurs de type II sont comparables dans le cas des signatures originales versus les signatures synthétiques et ceci pour les différentes pondérations utilisées. C’est ce que l’on pouvait espérer pour une représentation valide des signatures, puisque dans ce cas une signature synthétique peut

⁶Pour rappel, ce système n’a pas été optimisé dans ce contexte

Tableau 5.17: Résumé des résultats avec les faux aléatoires

Pondération	WACOM		PENCEPT	
	ori.	syn.	ori.	syn.
par défaut	2.0 %	2.1 %	1.6 %	1.8 %
paramétrique	3.4 %	2.9 %	4.9 %	4.3 %
dynamique	16.5 %	13.5 %	9.2 %	8.0 %
statique	31.9 %	33.1 %	46.8 %	47.3 %

Tableau 5.18: Pourcentage de même réponse avec les faux aléatoires

Pondération spécifique	Wacom	Pencept
par défaut	98.1 %	97.3 %
paramétrique	97.0 %	96.9 %
dynamique	87.4 %	87.1 %
statique	92.6 %	92.5 %

se substituer à une signature originale. Les résultats détaillés selon les paramètres⁷ *aa*, *rr*, *ii*, *ar*, *ra*, *ai*, *ia*, *ri* et *ir* sont donnés en annexe page 224. Enfin, le tableau 5.18 donne le pourcentage de même réponse pour les signatures originales et synthétiques (acceptation, rejet et incertain) sur l'ensemble des faux aléatoires. Dans ce tableau on constate bien qu'en grande majorité les réponses sont les mêmes pour les signatures originales et synthétiques. Les écarts avec le 100 % s'explique par les quelques difficultés qui demeurent encore lors de l'extraction des paramètres pour la représentation de signatures. Celles-ci vont être présentés dans la section suivante.

Dans le tableau 5.17, on peut constater que VDS commet beaucoup d'erreur de type II en statique. Donc les résultats de la validation de la statique obtenus précédemment sont à pondérer. Toutefois ceci ne retire rien à la capacité de la représentation

⁷Voici pour mémoire leur signification: la lettre de gauche indique, pour chacun des couples, le résultat du système VDS sur un exemplaire original avec "a" pour *accepté*, "r" pour *refusé* et "i" pour *incertain*. La lettre de droite quant à elle indique le résultat pour l'exemplaire synthétique correspondant à l'original avec la même signification pour les lettres. Ainsi "aa" indique que VDS a accepté la signature originale et la synthétique correspondante, tandis que "ar" signifie qu'il a accepté la signature originale mais rejeté la synthétique correspondante

de reproduire la statique des signatures. Pour en témoigner, nous avons mis en annexe F et G des exemples de signatures originales et synthétiques. Dans l'annexe F, on trouvera une comparaison entre les originaux et les synthétiques pour les quatre signatures de la figure 5.1 page 139. Ces signatures représentent un exemple typique pour les signatures: nord-américaines, européennes, arabes et chinoises. Pour ces différentes signatures nous avons comparé: les images, les vitesses curviligne et angulaire. Enfin, Dans l'annexe G, on trouvera un exemple pour les 22 signataires de la banque.

5.6 Analyse des problèmes

Comme nous avons pu le voir, la mise en œuvre du modèle permet d'obtenir une très bonne représentation des signatures. Cependant elle n'est pas parfaite. Ainsi, dans les tableaux précédents, on constate qu'il existe des signatures synthétiques rejetées. Lorsque l'original (cas "rr") a été rejeté, il est compréhensible que la signature modélisée correspondante soit rejetée. De même, lorsque le résultat est incertain, il n'y a pas de grande surprise lorsque le synthétique est rejeté. Par contre, lorsque l'original est accepté, on s'attend pour la validation de notre représentation que le synthétique le soit aussi. Même dans les tableaux présentant les meilleurs résultats, il existe des signatures originales acceptées par VDS dont le synthétique est refusé.

Le rejet de ces synthétiques est lié principalement à une seule cause: une mauvaise détermination — pendant le traitement de l'image statique — de la position de certaines cibles virtuelles. La figure 5.5 donne un exemple de signature synthétique rejetée qui illustre bien ce problème, avec sur le même graphique la signature originale acceptée.

Dans la partie encerclée on trouve l'explication de ce rejet, par une forme différente de la boucle par rapport à l'original. En ce point, la position de la cible virtuelle a été mal estimée. Dans ce cas particulier, la distance à parcourir, entre la cible virtuelle

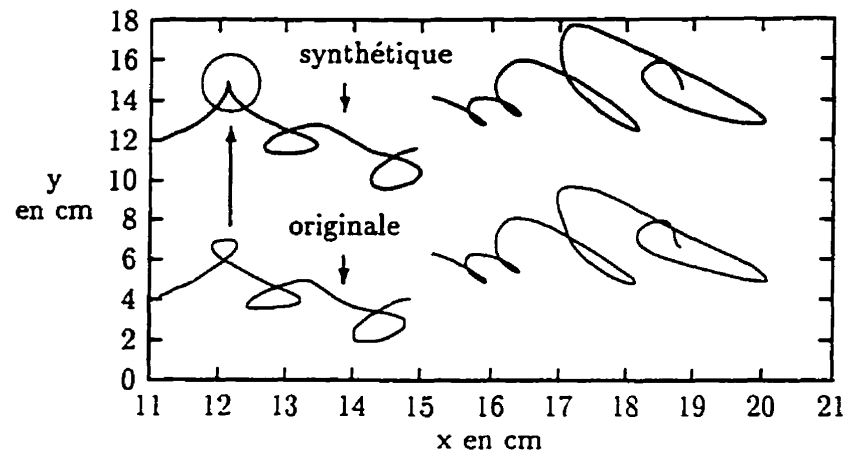


Figure 5.5: Illustration d'une cause de rejet en statique

précédente et celle qui pose problème, a été sous estimée. Ceci provoque lors de la modélisation de la cinématique, une absence de superposition des traits, ce qui fait apparaître un point de rebroussement au lieu d'une boucle.

Il existe aussi parfois le cas contraire c'est-à-dire une surestimation de la distance à parcourir. Dans ce cas, on peut voir apparaître une boucle de taille importante avec comme conséquence un déplacement du reste de la composante. La figure 5.6 illustre ce phénomène.

Ce problème de mauvaise détermination de la position des cibles virtuelles qui apparaît dans certains cas, est lié au choix de la mise en oeuvre du modèle delta lognormal vectoriel qui a été fait dans cette thèse. Il explique aussi les valeurs de EQM relativement fortes que l'on peut observer dans les tableaux E.1 et E.2. Même si ce choix n'est pas à remettre en question — compte tenu des bons résultats globaux obtenus avec la validation de la représentation des signatures — des ajustements restent à faire.

Pour déterminer la position des cibles virtuelles, nous nous sommes basé à la fois sur la statique et la dynamique. Dans la plupart des cas, la détermination de la posi-

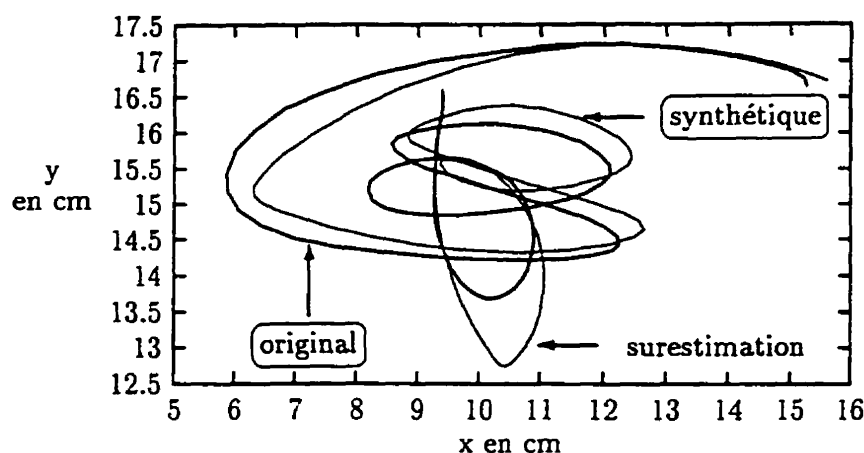


Figure 5.6: Problème de surestimation de la distance

tion des cibles virtuelles par le point d'intersection des 2 traits (voir chapitre 4) donne de bons résultats. Le problème vient essentiellement des heuristiques introduites pour la détermination des points d'intersection. Normalement, lorsque 2 cercles (2 traits consécutifs) se coupent, il peut y avoir 2 points d'intersection. Des 2 points, lequel retenir?

La première heuristique a été de choisir le point le plus proche du point de vitesse minimale sur le tracé original (généralement le point où la courbure est la plus importante). La figure 5.7 illustre cette heuristique. C'est ce qui se produit dans la majorité des cas, le bon point (dans ce cas #2) est retenu.

Cependant on obtient parfois la situation illustrée par la figure 5.8. Dans ce cas on se trompe de point d'intersection — on retient le point #1 — ce qui conduit à une sous estimation de la distance à parcourir. Pour régler ce problème, nous avons ajouté une distance minimale à parcourir. Cette distance est celle qui sépare la cible virtuelle précédente du point de vitesse minimum sur le tracé (celui qui servait dans l'exemple de la figure 5.7 à retenir l'un ou l'autre des points d'intersection). Cette nouvelle heuristique a permis de régler le problème de l'exemple de la figure 5.8 en

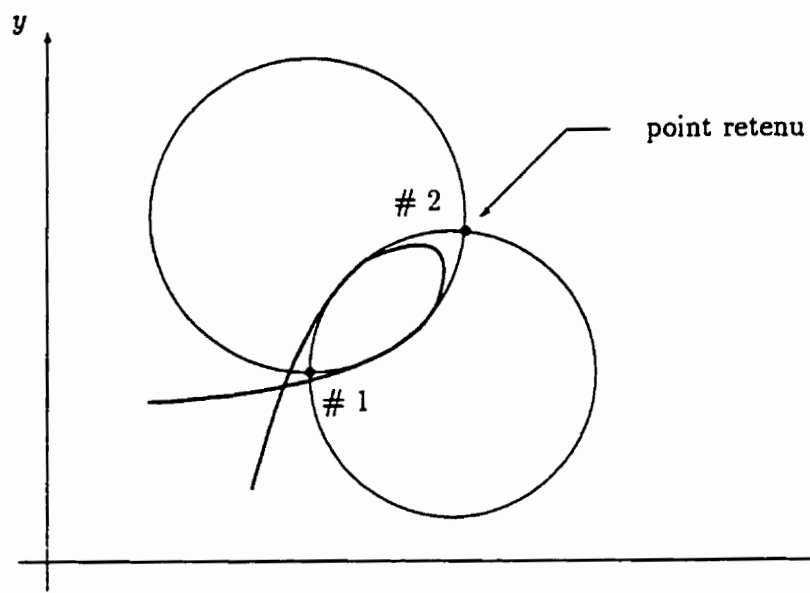


Figure 5.7: Première heuristique

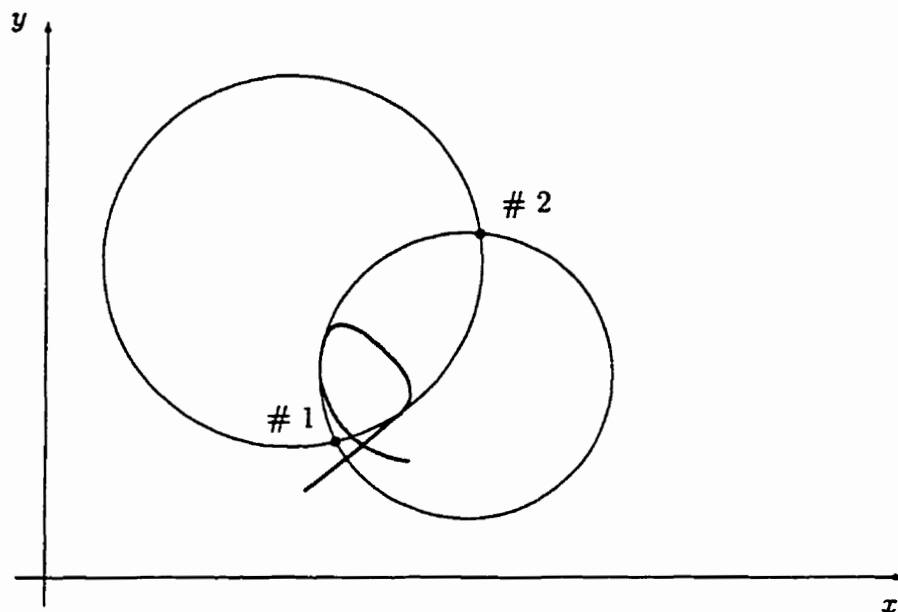


Figure 5.8: Deuxième heuristique

sélectionnant le point #2. Mais cela a occasionné un autre problème dans certains cas pour de nouvelles situations.

En effet, il arrive que le point d'intersection, compte tenu de l'estimation des courbures, soit très loin du tracé. Cette surestimation de la distance à parcourir entre les deux cibles virtuelles successives entraîne une déformation de la composante qui peut se prolonger sur les traits suivants (c'était le cas de la figure 5.6).

Une troisième heuristique a donc été introduite pour corriger cette surestimation, en fixant une limite maximum pour le parcours entre 2 cibles virtuelles. Cette limite est basée sur le calcul de la distance minimum décrite un peu avant. Par défaut, la distance maximum est fixée à deux fois la distance minimum à parcourir. Si le déplacement jusqu'à la prochaine cible virtuelle entraîne de couvrir une distance qui dépasse ce maximum, la cible virtuelle est ramenée artificiellement sur la courbe, au point de vitesse minimum.

Mais le problème — c'est ce que l'on retient après analyse des résultats — est un peu plus fondamental que la mise en œuvre de ces heuristiques. La véritable difficulté en dessous de ce problème réside dans la détermination du nombre de traits dans la signature. Pour l'instant nous nous basons sur les cloches asymétriques des profils de vitesse pour déterminer le nombre de traits. Or, dans le cas d'une grande superposition de deux traits successifs, et compte tenu du filtrage des signaux, deux pics peuvent fusionner. Cette fusion quasi complète est responsable dans certains cas de la source des erreurs dans la mise en œuvre du modèle pour la représentation des signatures. Car actuellement, un tracé manuscrit est vu comme la génération d'un seul trait, si la superposition des profils des courbes delta lognormales n'est pas distinguable sur les profils de vitesse curviligne. Néanmoins, compte tenu des bons résultats obtenus pour la validation de notre représentation des signatures, on peut remarquer que ces singularités ne sont pas très courantes. Un tracé complexe étant la concaténation d'une suite de traits élémentaires qui se succèdent temporellement, généralement les traits sont distinguables par la cloche delta lognormale qu'ils engendrent sur les profils de vitesse curviligne. De plus, un sur-échantillonnage de la signature permet parfois de régler le problème en dissociant 2 delta lognormales qui ont fusionnées.

5.7 Compression de données

Pour faire une estimation de la compression que peut apporter la représentation deux mesures ont été considérées. Cependant il faut bien comprendre de la compression n'est pas le but visé par la représentation. Celle-ci constitue seulement un avantage qu'on peut lui attribuer dans le contexte de son utilisation dans un système de vérification de signatures.

Dans la première mesure, la taille totale de la banque de signatures — somme de la taille de tous les fichiers ASCII contenant les signatures — est comparées à la taille de

la représentation de toutes les signatures de la banque (fichiers ASCII également). En nombre d'octets, la première en totalise 1298108 et la seconde 376723. Ceci donne par conséquent une compression de 71% ($1298108 - 376723/1298108$). Il faut de plus souligner, qu'avec la représentation il doit y avoir pratiquement aucune perte d'information par rapport à celle obtenue par la tablette pour laquelle la fréquence d'échantillonnage est de 100 Hz. En baissant le taux d'échantillonnage pour obtenir le même taux de compression, on obtiendrait une perte substantielle d'information. Par contre avec la représentation proposée pratiquement toute l'information est conservée.

Dans la deuxième mesure, un logiciel⁸ de compression très répandu a été utilisé à la fois sur les fichiers ASCII de la banque et sur ceux de la représentation de la banque. Une fois compressée la banque occupe 345661 octets tandis que la représentation totalise 116263 octets. Cette fois-ci on obtient un taux de compression de 66%.

Donc, à information égale, on peut compresser d'environ 70% une signature grâce à la représentation basée sur le modèle delta lognormal vectoriel. Avec les fichiers compressés à partir de la représentation dans des fichiers ASCII, on peut déduire qu'une signature peut être stockée, en moyenne, sur 530 octets.

La taille de stockage d'une signature pourrait être réduite si on utilisait un codage binaire plutôt qu'ASCII des fichiers de représentation. Considérant que pour chaque trait on a huit paramètres (compte tenu que la valeur de σ_1 est égal à celle de σ_2) et que chacun des paramètres peut être codé sur un octet⁹, alors chaque trait peut être codé sur 8 octets. Par conséquent, une signature complète contenant n traits sera codée sur $n \times 8$ octets. Pour la signature utilisée dans le chapitre 4, pour le choix de la représentation, 64 octets serait nécessaire pour son stockage et ceci avec l'information statique et dynamique au complet.

Pour 22 signatures (premier exemplaire de chaque individu), on obtient une durée totale de 55.51 secondes. Sachant que pour ces 22 signatures il faut générer 567

⁸pkzip

⁹codage en valeur entière après utilisation d'un facteur multiplicatif adéquat selon la précision désirée

traits, on a par conséquent en moyenne 10 traits par seconde. Donc, en moyenne il faudra 80 octets pour coder 1 seconde de signature. Si, on diminuait la fréquence d'échantillonnage en considérant qu'il n'y a plus d'information pertinente au dessus de 15 Hz alors il faudrait selon le théorème de Shanon échantillonner à 30 Hz (soit 30 points par seconde). De plus les signaux x et y provenant de la tablette demande chacun 2 octets selon la résolution utilisée par la tablette. Donc en comparaison, il faudrait 120 octets pour représenter 1 seconde de signatures avec une fréquence d'échantillonnage plus basse.

En résumé, pour la conception d'un système de vérification de signatures, la représentation offre un avantage supplémentaire au niveau de la compression de données. Dans les applications où un grand nombre de signatures doit être stocké (banque de signatures) ou un média de faible capacité doit être utilisée (carte à puce), celle-ci offrirait une solution très satisfaisante.

Actuellement, les meilleurs systèmes de vérification dynamique de signatures sont basées sur la comparaison de signaux enregistrés au cours du temps (approche fonction). À cause de la taille en nombre d'octets de ces signaux à sauvegarder dans la banque de références, ces systèmes se trouvent limités dans leur application. La représentation des signatures pourrait servir à sauvegarder ces signaux sous une forme compacte et par conséquent rendre possible l'application de tels systèmes pour le traitement d'un grand nombre de signatures.

5.8 Conclusion

Comme nous venons de le voir, le modèle delta lognormal vectoriel de R. Plamondon — grâce à la mise en œuvre qui en a été faite dans le cadre de cette thèse — permet de donner une représentation des signatures. Dans ce chapitre, nous venons de présenter la validation de celle-ci sur une banque de 220 signatures provenant de 22 individus (10 signatures par individu) permettant de couvrir quatre grands types de

signatures. Ces signatures permettaient en outre de couvrir des mouvements ayant des tendances haut-bas (chinois), gauche-droite (nord-américains et européens) et droite-gauche (arabes). La validation a été réalisée grâce à un système de vérification de signatures (système VDS). Ce système, par une approche à plusieurs niveaux, a permis de valider la reconstruction de l'image (statique) et des profils de vitesse (dynamique), ces dernières étant générées à partir de la représentation des signatures.

La conclusion qui suit va permettre de résumer l'aspect original de cette thèse, puis va présenter les perspectives qui découlent des travaux présentés dans celle-ci.

Chapitre 6

CONCLUSIONS

Dans notre société, la vérification de l'identité est devenue une nécessité pour contrôler l'accès à des données, à des ressources informatiques, à un compte de banque, etc. Dans l'introduction de cette thèse, certaines façons de procéder pour effectuer la vérification de l'identité ont été présentées et il est ressorti de ce survol que la signature manuscrite, s'avère être une des solutions les plus prometteuses à cause de son acceptation sociale et des habitudes déjà prises dans de nombreuses sociétés. C'est pourquoi, un certain nombre de chercheurs se sont intéressés à la vérification de l'identité par la signature et ont tenté de résoudre ce problème au moyen de systèmes d'acquisition et d'algorithmes mis en oeuvre sur des ordinateurs. Néanmoins, pour être un système de vérification fiable, il faut que celui-ci appartienne à la classe 4 regroupant les systèmes de type biométrique. Dans ces systèmes, on cherche à identifier les individus par une bio-caractéristique unique et inimitable.

Même si actuellement certains systèmes reposent sur des solutions fonctionnelles donnant de bons résultats et malgré le fait que des brevets existent quant à ce type de systèmes, il nous est apparu que le problème de *la représentation des signatures* constitue un élément clef, une condition essentielle, à toute percée dans ce domaine.

6.1 Apports et Contributions originales

Par l'adaptation d'un modèle de génération de mouvements rapides pour obtenir une représentation des signatures, cette thèse apporte une contribution originale pour le développement futur de systèmes de classe 4 basés sur la signature manuscrite. Si une telle application venait à être réalisée, ce serait la première fois que l'on concevrait un système de vérification de signatures basé sur l'espace individu plutôt que sur l'espace des mesures comme c'est le cas actuellement (voir pour mémoire la figure 1.1 page 7).

La représentation proposée possède les qualités nécessaires pour la conception de systèmes automatiques de vérification de signatures, c'est-à-dire qu'elle est capable :

- de reproduire l'image (la statique) ;
- de reproduire la dynamique ;
- de paramétrer la signature ;
- d'accepter certaines transformations comme la rotation, la translation, les homothéties spatiales et temporelles.

Le gros avantage de cette représentation est que sous une forme paramétrique, elle contient toutes les données sur la signature. Il n'y a donc aucune perte d'informations comme c'est normalement le cas avec l'approche paramétrique. Les paramètres de cette représentation (D_1 , D_2 , μ_1 , μ_2 , σ_1 , σ_2 , t_0 , C_0 et θ_0) devraient faciliter la conception d'un système de vérification de signatures. Autre point très important, c'est qu'avec cette représentation paramétrique, il est possible de compresser l'information d'une signature dans une centaine d'octets. Ainsi, nous avons mesuré qu'il faut en moyenne 80 octets par seconde de signature pour pouvoir la sauvegarder. La possibilité de compression est capitale pour des applications nécessitant le stockage de la signature de référence sur une carte magnétique ou à puce électronique ou pour la constitution d'une très grosse banque de signatures.

La description psycho-physique du processus de génération qu'apporte la représentation des signatures permet de mieux comprendre le geste de signer. Grâce à cette représentation on peut dégager l'appartenance des paramètres du modèle soit :

- à la représentation haut niveau (cibles virtuelles, D , C_0 , θ_0) ;
- à la planification du mouvement (R , D_1 , D_2) ;
- au système neuromusculaire.

Cette ensemble de paramètres devrait constituer "*l'empreinte*" du signataire. Ainsi, tout système de vérification de signatures basés sur cette représentation devrait normalement appartenir à la classe 4 (système biométrique).

La représentation des signatures étant basée sur un modèle de génération de mouvements rapides conçu à l'origine pour des mouvements simples, cette thèse contribue également à valider ce modèle sur des tracés complexes que sont les signatures. Ceci permet entre autres, de mieux comprendre le processus de génération des signatures.

Pour bâtir notre représentation, nous avons du étudier les courbes delta lognormales. Cette thèse donne quelques éléments pour la compréhension de cette courbe et de ces propriétés dans certains cas particuliers.

Avec la proposition de trois principes de bases pour la génération des signatures données au chapitre 4, cette thèse donne des pistes de départ pour approfondir la connaissance des mouvements complexes. Ainsi dans ce chapitre, nous avons également vu qu'il est possible de poser une dépendance directe entre le temps de mouvement (MT) et un paramètre cinématique du système neuromusculaire antagoniste (μ_2) par la relation :

$$\mu_2 = \ln(MT) \quad (6.1)$$

La relation (6.1) — un cas particulier des profils d'une courbe delta lognormals — semblent très intéressante. Elle a permis d'ouvrir des pistes dans la compréhension du

processus de génération de signatures grâce à une étude de la variation de la précision spatiale relative. L'intérêt de cette relation c'est qu'elle lie un paramètre neuromusculaire "*temporel*" à la notion de durée de mouvement (*MT*). L'arrêt du mouvement devient dans ce cas uniquement dépendant de la valeur d'un des paramètres du système neuromusculaire antagoniste, ce qui est particulièrement intéressant. De plus, il est important de souligner que le processus de génération de signatures accepte mieux des valeurs de précision relative faibles, si le *contrôle* de la durée du mouvement est obtenu en respectant les conditions conduisant à la relation (6.1).

Pour extraire les paramètres des signatures par l'intermédiaire du modèle, cette thèse propose également une approche originale en scindant l'extraction en deux étapes. Dans la première, l'image de la signature est analysée en utilisant partiellement l'information cinématique du tracé. Ceci permet d'extraire les cibles virtuelles qui sont déduites de l'intersection de traits successifs obtenus — par régression — sur l'image de la signature. Dans une deuxième étape, grâce à la statique extraite précédemment, on est en mesure d'extraire les paramètres cinématiques grâce encore à la régression non linéaire et la théorie cinématique de R. Plamondon. Avec cette méthode, c'est à notre connaissance la première fois que l'on est capable de reproduire, d'analyser et d'étudier des signatures à l'aide d'un modèle conforme à la psychophysique des mouvements rapides. De plus cette approche est entièrement automatique et, est capable de reproduire la statique et la dynamique de n'importe quel type de signatures (arabe, chinoise, européenne, nord-américaine).

Ces différentes contributions ouvrent des perspectives que d'autres chercheurs pourront éventuellement explorer. La section qui suit présente celles que nous entrevoyons.

6.2 Perspectives

La première perspective qui nous vient à l'esprit, compte tenu du travail accompli pour réaliser cette thèse, consiste à améliorer l'approche utilisée pour l'extraction des paramètres. Après coup, et suite aux résultats obtenus, il apparaît que l'extraction en deux étapes est bonne, mais la première conditionne les résultats de la seconde. Par conséquent, il faut porter un soin particulier à l'extraction des cibles virtuelles. Une surestimation ou encore une sous-estimation importante de leur position peut perturber l'image d'une signature lorsque celle-ci est régénérée par le modèle. Ainsi, dans cette thèse, nous avons utilisé les points d'échantillonnage provenant de la tablette pour extraire les caractéristiques statiques de la signature. Or, pour chaque trait constituant la signature le nombre de points d'échantillonnage est moins important dans la partie proche du maximum de vitesse. Selon une de nos hypothèses (chapitre 4), c'est autour de ce maximum qu'il existe le moins de superposition. Malheureusement, compte tenu de la régression, les portions à basse vitesse dans une cloche asymétrique prennent plus d'importance que celles se trouvant près du maximum de vitesse à cause du plus grand nombre de points dans les zones à plus faible vitesse. Pour améliorer l'estimation de la courbure des différents traits, il faudrait soit:

- utiliser une pondération inversement proportionnelle à la vitesse ;
- ré-échantillonner le signal dans la portion intéressante (sommet de la cloche) en augmentant le nombre de points dans cette zone.

L'une ou l'autre de ces améliorations pourrait donner de meilleurs résultats et peut être résoudre les problèmes de sur et de sous-estimation de la position des cibles virtuelles que l'on obtient parfois.

La perspective la plus attrayante pour les chercheurs intéressés au domaine de la vérification de signatures sera sans conteste, le potentiel offert par cette représentation, surtout à cause des retombées économiques qui peuvent en découler. Ainsi, les

fraudes de cartes de crédit pourraient être largement freinées si un contrôle automatique de la signature était réalisé au moment de l'achat. La représentation des signatures offre du potentiel pour la réalisation de tels systèmes. De plus, la compression de données offerte par cette représentation permettrait de sauvegarder directement la signature sur la carte elle-même, ce qui offrirait une sécurité supplémentaire.

L'approche qui consiste à extraire les paramètres du modèles en deux étapes — dont le succès réside sur l'existence des cibles virtuelles — pourrait être mis à profit pour la conception d'un système automatique de vérification de signatures. Selon la tendance actuelle avec l'approche multi-niveaux, la vérification pourrait être effectuée à chacune des deux étapes — extraction de la statique et extraction de la cinématique — permettant d'aboutir à la représentation des signatures. Après l'extraction de la statique avec les cibles virtuelles, une première vérification peut être effectuer pour éliminer rapidement les faux aléatoires, c'est-à- dire les imitations faites sans tenter d'imiter la forme de la signature. Si ce niveau est franchi, on peut alors procéder à une vérification plus fine sur la dynamique de la signature — caractéristique quasiment impossible à imiter — après extraction des paramètres cinématiques. Ainsi, notre approche originale pourrait permettre de répondre au besoin de la vérification de signature, tout en apportant une solution pour l'extraction automatique des paramètres, car une des difficultés de cette thèse a été de la rendre possible avec la régression non linéaire.

Mais si la représentation des signatures offre des perspectives très intéressantes pour la réalisation d'un système de vérification de signatures par son aspect paramétrique, il ne faut pas sous-estimer la dimension du problème. Si, en une vingtaine d'années certaines équipes sont parvenues à des taux d'acceptation de 99% de vrais signatures et de 1% d'acceptation de faux sur de petites banques de signatures, le dernier pour-cent risque d'être long à aller chercher si l'on suit la règle du 90-10¹. La représentation de signatures proposée dans cette thèse vient apporter un élément

¹ 10% du temps pour faire 90% de l'ouvrage et 90% du temps pour faire les 10% d'ouvrage restant

nouveau dans ce domaine de recherche qui permettra peut-être d'obtenir des meilleurs résultats, mais d'autres difficultés demeurent. Ainsi, même si le modèle delta lognormal vectoriel ne nécessite pas de normalisation au moment de l'extraction et que la représentation gère facilement différentes transformations, une étape de normalisation sera nécessaire. La normalisation est cruciale pour l'étape de comparaison de la signature de référence et de la signature à tester. Déjà on peut se poser le problème de savoir comment va-t-on normaliser les signatures ? Va-t-on prendre une taille normalisée pour toutes les signatures ou normaliser la signature test par rapport à la taille de la signature de référence ? D'ailleurs, y aura-t-il plusieurs références ou une seule ? La référence ou les références seront-elles adaptées pour tenir compte des modifications au cours du temps ? Une fois résolu le problème de la normalisation, du nombre de références et de l'évolution des références, il reste à aborder le problème de la comparaison. En vérification de signatures, des méthodes de comparaison existent pour l'approche paramétrique. Dans toutes les méthodes proposées, le vecteur de paramètres a une taille fixe, et par une métrique appropriée, il est possible de calculer une distance entre la signature de référence et la signature test. Ensuite en fonction d'un seuil on décide d'accepter ou de refuser la signature. Avec notre représentation paramétrique, la taille du vecteur de mesure varie. Elle dépend du nombre de traits dans la signature. Donc, il faudra résoudre le problème de la métrique à adopter pour comparer deux représentations générant des signatures équivalentes à une transformation près (translation, rotation, etc.). Il n'existe pas actuellement de solutions pour ce genre de problème en vérification de signatures. Toutefois, les approches par fonctions ont résolu ce type de problèmes — signaux de tailles différentes — en utilisant la programmation dynamique ou la corrélation régionale par exemple. Ces méthodes utilisées surtout pour la comparaison de fonctions, seraient-elles efficaces dans le cas de l'utilisation de la représentation des signatures ? Donc, bien que nous estimons avoir franchi une étape importante en proposant une représentation des signatures originales, il reste du travail pour d'autres thèses afin d'aborder la normalisation, le

choix des références et la méthode de comparaison à utiliser.

Cette thèse ouvre aussi des perspectives dans l'étude du mouvement et dans sa compréhension. La représentation proposée permettra à court terme d'affiner le modèle présenté dans cette thèse et ainsi, participer à son amélioration, ce qui est à la base de tout processus de modélisation (voir figure 2.1 page 17).

Enfin, cette représentation pourrait servir au développement ou à l'évaluation des systèmes de vérification déjà existants. Ainsi, pour les chercheurs ayant privilégié l'approche réseaux de neurones, la représentation serait bénéfique pendant la phase d'apprentissage du réseau. Un réseau demande un nombre assez important d'exemplaires de signatures qu'il n'est pas raisonnable de demander à un utilisateur pendant la phase d'abonnement au système. La représentation des signatures proposée dans cette thèse — en considérant l'influence des paramètres montrée au chapitre 4 — pourrait servir à générer de multiples exemplaires différents à partir d'une seule représentation et ceci, en faisant varier quelques paramètres seulement. De plus, elle permettrait de générer des "*faux*" également nécessaires pendant la phase d'apprentissage du réseau et qui pour l'instant font défaut.

Enfin, la représentation pourrait servir pour l'évaluation de systèmes existants. En faisant varier progressivement les paramètres afin de modifier l'image et la dynamique de la signature, on pourrait mesurer — en pourcentage de variation d'un paramètre par exemple — à quel moment le système refuse une signature originale déformée. Ceci permettrait alors de faire l'évaluation du système de vérification et faciliter sa mise au point.

Bibliographie

- [1] J. Aitchison et J. A. C. Brown. *The lognormal distribution*. Cambridge University Press, New York, 1957.
- [2] A. Alimi. *Contribution au développement d'une théorie de génération de mouvements simples et rapides: application au manuscrit*. thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, 1996.
- [3] A. Alimi et R. Plamondon. Parameter analysis of handwriting strokes generation models. Dans *Proc. of the 6th Int. Conf. on Handwriting and Drawing*, pages 4–6, Paris, juillet 1993.
- [4] A. Alimi et R. Plamondon. Performance analysis of handwritten stroke generation models. Dans *Proc. of IWFHR 3rd International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition*, pages 272–283, Buffalo, mai 1993.
- [5] R. Beatson. Signature dynamics in personal identification. Dans *Proc. 4th World Congr. Comput. Commun. Security And Protection*, pages 179–196, Paris, 1985.
- [6] L. Bechet. Reconnaissance dynamique de la signature. Dans *6th conv. of European Financial Marketing Ass.*, pages 93–97, Montreux, 1984.
- [7] G. A. Bills, M. J. Varady, et K. P. Zimmermann. Spectral analysis of script and signatures. Dans *Proceedings of the Third International Symposium on*

Handwriting and Computer Applications, pages 157–159, Montréal, Canada, juillet: 20–23 1987.

- [8] G. A. Bills et K. P. Zimmermann. Spectral analysis of right handed versus left handed on-line script. Dans *IEEE/Seventh Conference of The Engineering In Medicine And Biology Society*, pages 738–740, 1985.
- [9] G. Boccignone, A. Chianese, L. P. Cordella, et A. Marcelli. Recovering dynamic information from static handwriting. *Pattern Recognition*, 26(3):409–418, 1993.
- [10] J. P. Bonnefoy et G. Lorette. Reconnaissance automatique d'images de signatures manuscrites: Un nouveau critère de détermination de variables discriminantes. Dans *Premier Colloque Image*, pages 421–426, Biarritz, France, mai 1984.
- [11] J. J. Brault. *Proposition et vérification d'un coefficient de difficulté d'imitation des signatures manuscrites*. thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, 1988.
- [12] J. J. Brault et R. Plamondon. A complexity measure of handwritten curves: modeling of dynamic signature forgeries. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(2):400–412, mars-avril 1993.
- [13] J. J. Brault et R. Plamondon. Segmenting handwritten signatures at their perceptually important points. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 15(9):953–957, mai 1993.
- [14] H. D. Crane et J. S. Ostrem. Automatic signature verification using a three-axis force-sensitive pen. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 13(3):329–337, mai-juin 1983.

- [15] P. de Bruyne. Dynamic signature verification using your own pen. Dans *International Carnahan Conference on Security Technology: Electronic Crime Countermeasures*, pages 5–8, 1988.
- [16] K. Dhar et A. Kunz. Digital techniques to analyse handwritten signatures. Dans *International Carnahan Conference on Security Technology: Crime Countermeasures*, pages 9–13, 1988.
- [17] R. F. Farag et Y. T. Chien. Online signature verification. Dans *Proc. Of the Int. Conf. On On-Line Interactive Computing*, London, septembre 1972.
- [18] P. M. Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6):381–391, 1954.
- [19] P. M. Fitts et J. R. Peterson. Information capacity of discrete motor responses. *Journal of Experimental Psychology*, 67(2):103–112, 1964.
- [20] P. Gentric et J. Minot. Authentification dynamique de signatures par réseaux de neurones. *Revue Annuelle LEP*, pages 34–36, 1990.
- [21] R. Gibrat. Une loi des répartition économiques: l'effet proportionnel. *Bull. Statist. Gén. Fr.*, 19:469–513, 1930.
- [22] W. Guerfali. *Modèle delta lognormal vectoriel pour l'analyse du mouvement et la génération de l'écriture manuscrite*. thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, 1996.
- [23] W. Guerfali et R. Plamondon. *Techniques d'extraction de paramètres pour le modèle delta Log-Normal*. laboratoire scribens, École Polytechnique de Montréal édition, 1993.

- [24] W. Guerfali et R. Plamondon. Robust parameter extraction techniques for the delta lognormal model. Dans *Proc. of Vision Interface '94*, pages 218–225, Banff, Alberta, mai 1994.
- [25] W. J. Hale et B. J. Paganini. An automatic personal verification system based on signature writing habits. Dans *Carnahan Conference on Crime Countermeasures*, pages 121–125, 1980.
- [26] T. Hastie, E. Kishon, M. Clark, et J. Fan. A model for signature verification. Dans *Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pages 191–196, octobre 1991.
- [27] N. M. Herbst et C. N. Liu. Automatic signature verification based on accelerometry. *IBM Journal of Research and Development*, 21(3):245–253, mai 1977.
- [28] A. K. Hrechak et J. A. McHugh. Atomated fingerprint recognition using structural matching. *Pattern Recognition*, 23(8):893–904, 1990.
- [29] M. J. Hunt. Delayed decisions in speech recognition - the case of formants. *Pattern Recognition Letters*, 6(2):121–137, juillet 1987.
- [30] R. Joyce et G. Gupta. Identify authentication based on keystroke latencies. *Communications of the Association for Computing Machinery*, 33(2):168–176, février 1990.
- [31] J. C. Kapteyn. *Skew frequency curves in biology and statistics*. P. Noordhoff, Astronomical Laboratory at Groningen, 1903.
- [32] C. Kayser. *Physiologie: système nerveux et muscles*, volume 2. Flammarion médecine – sciences, 1976.
- [33] M. Lalonde et J. J. Brault. A neural network approach to handwritten curve partitioning. Dans *Proc. of Vision Interface '93*, pages 136–141, 1989.

- [34] C. F. Lam et D. Kamins. Signature recognition through spectral analysis. *Pattern Recognition*, 22(1):39–44, 1989.
- [35] F. Lamarche. Caractérisation d'initiale captées par une tablette graphique. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, 1985.
- [36] F. Lamarche et R. Plamondon. *Logiciel d'acquisition d'échantillon et de caractérisation d'initiales*. Laboratoire Scribens, École Polytechnique de Montréal édition, 1984.
- [37] F. Lamarche et R. Plamondon. Segmentation and feature extraction of handwritten signature patterns. Dans *Proc. of 7Th IAPR International Conference on Pattern Recognition*, pages 756–759, Montréal, août – septembre 1984.
- [38] F. Leclerc. Validation d'un modèle générateur de vitesse à profil gaussien sur des signatures manuscrites. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, novembre 1989.
- [39] F. Leclerc. Rapport d'activité. Rapport technique, Laboratoire Scribens, École Polytechnique de Montréal, août 1993. document interne.
- [40] F. Leclerc et R. Plamondon. Validation d'un modèle de la fonction de transfert du bras sur des signatures manuscrites. Dans *Proc. of Vision Interface '90*, pages 105–111, Halifax, Canada, mai 1990.
- [41] F. Leclerc et R. Plamondon. Automatic signature verification: The state of the art 1989-1993. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 8(3):643–660, 1994.
- [42] F. Leclerc, R. Plamondon, et G. Lorette. Des gaussiennes pour la modélisation des signatures et la segmentation de tracés manuscrits. *Traitement du signal*, 9(4):347–358, 1992.

- [43] S. Lee et J. C. Pan. Offline tracing and representation of signatures. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 22(4):755-771, juillet-août 1992.
- [44] C. N. Liu, N. M. Herbst, et N. J. Anthony. Automatic signature verification: system description and field test results. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1):35-38, janvier 1979.
- [45] G. Lorette et R. Plamondon. Dynamic approaches to handwritten signature verification. Dans R. Plamondon et C. G. Leedham, éditeurs, *Computer Processing of Handwriting*, pages 21-47. World scientific publishing co., 1990.
- [46] D. Mc Alister. The law of geometric mean. Dans *Proceeding of the Royal Society of London*, pages 367-376, 1879.
- [47] J. Minot et P. Gentric. Authentification dynamique de signatures par réseaux de neurones. *Traitement du signal*, 8:423-430, 1990.
- [48] D. P. Mital et K. T. Lau. A microprocessor-based signature verification system. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 35(4):845-851, novembre 1989.
- [49] P. Morasso, V. Sanguineti, et T. Tsuji. A model for the generation of virtual targets in trajectory formation. Dans C. Faure, G. Lorette, A. Vinter, et P. Keuss, éditeurs, *Advances in Handwriting and Drawing: A Multidisciplinary Approach*, pages 333-348. Presses de l'École Nationale Supérieure de Télécommunication, 1994.
- [50] O. Nakamura, S. Mathur, et T. Minami. Identification of human faces based on isodensity maps. *Pattern Recognition*, 24(3):263-272, 1991.
- [51] W. Nelson et E. Kishon. Use of dynamic features for signature verification. Dans *Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, octobre 1991.

- [52] W. L. Nelson. Physical principles for economics of skilled movements. *Biological Cybernetics*, 46:135–147, 1983.
- [53] K. M. Newel et L. G. Carlton. On the relationship between peak force and peak force variability in isometric tasks. *Journal of Motor Behavior*, 17(2):230–241, 1985.
- [54] K. M. Newel, L. G. Carlton, et M. J. Carlton. The relationship of impulse to timing error. *Journal of Motor Behavior*, 14(1):24–45, 1982.
- [55] K. M. Newel, L. G. Carlton, S. Kim, et C. H. Chung. Space-time accuracy of rapid movements. *Journal of Motor Behavior*, 25(1):8–20, 1993.
- [56] K. M. Newel, L. E. F. Hoshlzaki, M. J. Carlton, et J. A. Halbert. Movement time and velocity as determinant of movement time accuracy. *Journal of Motor Behavior*, 11(1):49–58, 1979.
- [57] K. M. Newell. The speed-accuracy paradox in movement control: Errors of time and space. Dans G. E. Stelmach et J. Requin, éditeurs, *Tutorials in Motor Neuroscience*, pages 501–510. North Holland, 1980.
- [58] M. Parizeau. *Reconnaissance d'écriture cursive par grammaires floues avec attributs: étape vers la conception d'un bloc-notes électronique*. thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, août 1992.
- [59] J. R. Parks. Automatic identification of people. improving the performance of dynamic signature verification. Dans *IEE Colloquium (Digest)*, pages 4.1–4.5, 1990.
- [60] G. Pirlo. Algorithms for signature verification. Dans *Fundamentals in Handwriting Recognition*, pages 139–152, Château de Bonas, France, juin–juillet 1993.
- [61] R. Plamondon. La vérification automatique des signatures, recherches et développements. *Interface*, 5(3):16–21, 1984.

- [62] R. Plamondon. What does differential geometry tell us about handwriting generation. Dans *Proceedings of the Third International Symposium on Handwriting and Computer Applications*, pages 11–13, Montréal, Canada, juillet 1987.
- [63] R. Plamondon. Handwriting control: a functional model. Dans Rodney M. J. Cotterill, éditeur, *Models of Brain Function*, pages 563–574. Cambridge university press, 1989.
- [64] R. Plamondon. A handwriting model based on differential geometry. Dans R. Plamondon, C. Y. Suen, et M. L. Simmer, éditeurs, *Computer Recognition and Human Production of Handwriting*, pages 179–192. World scientific publishing co., 1989.
- [65] R. Plamondon. A fundamental law of human movement. Dans *NIAS Conference on Sequencing and Timing of Human Movement*, pages 19–20, Wassenaar, juin 1990.
- [66] R. Plamondon. A unified approach to study of target-directed movements. Dans *Nato Advanced Study Institute, Tutorials in Motor Neuroscience*, Ajaccio, France, septembre 1990.
- [67] R. Plamondon. Apparatus and method for digitizing and segmenting a handwriting movement. US Patent No. 5,077,802, décembre 1991.
- [68] R. Plamondon. On the origin of asymmetric bell-shaped velocity profiles in rapid-aimed movements. Dans G. E. Stelmach et J. Requin, éditeurs, *Tutorials in Motor Neuroscience*, pages 283–295. Kluwer academic publishers, 1991.
- [69] R. Plamondon. Method and apparatus for comparing a test handwritten signature with a reference signature by using informations relative to curvilinear and angular velocities of the signature. US Patent No. 5,101,437, mars 1992.

- [70] R. Plamondon. A model-based segmentation framework for computer processing of handwriting. Dans *Proc. of 11th International Conference on Pattern Recognition*, pages 303–307, The Hague, août–septembre 1992.
- [71] R. Plamondon. A theory of rapid movements. Dans G. E. Stelmach et J. Requin, éditeurs, *Tutorials in Motor Behavior II*, pages 55–69. Elsevier Science Publishers B. V. (North-Holland), 1992.
- [72] R. Plamondon. *The generation of rapid human movements: part I: A delta lognormal law*. Laboratoire scribens, École Polytechnique de Montréal édition, février 1993.
- [73] R. Plamondon. *The generation of rapid human movements: part II: quadratic and power laws*. Laboratoire scribens, École Polytechnique de Montréal édition, février 1993.
- [74] R. Plamondon. Looking at handwriting generation from a velocity control perspective. *Acta Psychologica*, 82:89–101, 1993.
- [75] R. Plamondon. Handwriting generation: the delta lognormal theory. Dans *Proc. of IWFHR –International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition*, Taipei, décembre 1994.
- [76] R. Plamondon. The handwritten signature as a biometric identifier: Psychophysical model and system design. Dans *Proc. of the 1995 European Convention on Security and Detection*, pages 23–27, Brighton, UK, 1995.
- [77] R. Plamondon. A kinematic theory of rapid human movements: part I. movement representation and generation. *Biological Cybernetics*, 72:295–307, 1995.
- [78] R. Plamondon. A kinematic theory of rapid human movements: part II. movement time and control. *Biological Cybernetics*, 72:309–320, 1995.

- [79] R. Plamondon, A. Alimi, P. Yergeau, et F. Leclerc. Modeling velocity profiles of rapid movements: a comparative study. *Biological Cybernetics*, 69:119–128, 1993.
- [80] R. Plamondon et J. J. Brault. A system for signature analysis and verification based on an accelerometric pen. Dans *Proc. Int. Carnahan Conf. On Security Technology*, pages 157–164, Zurich, 1983.
- [81] R. Plamondon et B. Clément. Dependence of peripheral and central parameters describing handwriting generation on movement direction. Dans *Human movement science*, pages 193–221. Elsevier Science Publishers B. V. (North-Holland), 1991.
- [82] R. Plamondon et F. Lamarche. Modelization of handwriting: a system approach. Dans H. S. R. Kao, G. P. van Galen, et R. Hoosian, éditeurs, *Graphonomics: Contemporary Research in Handwriting*, pages 169–183. Elsevier Science Publishers B. V. (North-Holland), septembre 1986.
- [83] R. Plamondon et G. Lorette. Automatic signature verification and writer identification - the state of the art. *Pattern Recognition*, 22(2):107–131, 1989.
- [84] R. Plamondon et G. Lorette. Designing an automatic signature verifier: problem definition and system description. Dans R. Plamondon et C. G. Leedham, éditeurs, *Computer Processing of Handwriting*, pages 3–20. World scientific publishing co., 1990.
- [85] R. Plamondon, G. Lorette, et R. Sabourin. Automatic processing of signature images: static techniques and methods. Dans R. Plamondon et C. G. Leedham, éditeurs, *Computer Processing of Handwriting*, pages 49–63. World scientific publishing co., 1990.
- [86] R. Plamondon et F. J. Maarse. A neuron oriented representation to compare biomechanical handwriting models. Dans *Proceedings of the Third International*

Symposium on Handwriting and Computer Applications, pages 2–4, Montréal, Canada, juillet 1987.

- [87] R. Plamondon et F. J. Maarse. An evaluation of motor models of handwriting. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 19(5):1060–1072, septembre–octobre 1989.
- [88] R. Plamondon, G. E. Stelmach, et N. Teasdale. Motor program coding representation from a handwriting generator model: the production of line responses. *Biological Cybernetics*, 69:443–451, 1990.
- [89] R. Plamondon et P. Yergeau. A system for the analysis and synthesis of handwriting. Dans *Proc. of International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition*, pages 167–177, Montréal, avril 1990.
- [90] R. Plamondon, P. Yergeau, et J. J. Brault. A multi-level signature verification system. Dans S. Impedovo et J. C. Simon, éditeurs, *From Pixels to Features III: Frontiers in Handwriting Recognition*, pages 363–370. Elsevier Science Publishers B. V. (North-Holland), 1992.
- [91] R. Plamondon, L. Yu, G. E. Stelmach, et B. Clément. On the automatic extraction of biomechanical information from handwriting signals. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 21(1):90–101, janvier–février 1991.
- [92] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, et W. T. Vetterling. *Numerical recipes in C: the art of scientific computing*. Cambridge University Press, 1988.
- [93] C. M. Privitera et R. Plamondon. A system for scanning and segmenting curvilinearly handwritten words into basic strokes. Dans *Proc. of ICDAR '95: International Conference on Document Analysis and Recognition*, pages 1047–1050, Montréal, août 1995.

- [94] J. Rosen. Biometric systems open the door. *Mechanical Engineering*, pages 58–61, novembre 1990.
- [95] C. C. Salvage. Dynamic signature verification: An effective and economical systems security control. Dans *Proc. Eur. Comput. Syst. Security Forum*, pages 141–148, 1984.
- [96] A. Samal et P. A. Iyengar. Automatic recognition and analysis of human faces and facial expressions: a survey. *Pattern Recognition*, 25(1):65–77, 1992.
- [97] Y. Sato et K. Kogure. Online signature verification based on shape, motion, and writing pressure. Dans *Proc. of 6th International Conference on Pattern Recognition*, pages 823–826, 1982.
- [98] R. A. Schmidt. Movement time as a determiner of timing accuracy. *Journal of Experimental Psychology*, 79(1):43–47, 1969.
- [99] R. A. Schmidt, D. Sherwood, H. N. Zelaznik, et B. Leikind. Speed-accuracy tradeoffs in motor behavior: Theories of impulse variability. Dans H. Heuer, U. Kleinbeck, et K. H. Schmidt, éditeurs, *Motor Behavior: Programming, control and acquisition*, pages 79–123. Springer-Verlag, Berlin, 1985.
- [100] R. A. Schmidt, H. N. Zelaznik, et J. S. Franck. Source of inaccuracy in rapid movement. Dans G. E. Stelmach, éditeur, *Information Processing in Motor Control and Learning*, pages 183–203. Academic Press, New York, 1978.
- [101] R. A. Schmidt, H. N. Zelaznik, B. Hawkins, J. S. Franck, et J. T. Quinn. Motor output variability: A theory for accuracy of rapid motor acts. *Psychological Review*, 86:415–451, 1979.
- [102] K. Shimizu et E. L. Crow. History, genesis, and properties. Dans Edwin L. Crow et Kunio Shimizu, éditeurs, *Lognormal distributions: theory and applications*,

numéro 88 dans *Statistics: textbook and monographs*, chapter 1, pages 1–25. Marcel Dekker, New York, 1988.

- [103] S. St Laurent. Réalisation et comparaison de divers filtres numériques. Projet de fin d'études (École Polytechnique de Montréal), 1991.
- [104] H. Taguchi, K. Kiriya, E. Tanaka, et K. Fujii. On-line recognition of handwritten signatures by feature extraction of pen movements. *Systems and Computers in Japan*, 20(10):1–14, 1989.
- [105] N. P. L. Verisign. A system for automatic verification of signatures. Rapport technique, National Physical Laboratory, National Research Development Corporation, 1975.
- [106] J. Vredenburg et W. G. Koster. Analysis synthesis of handwriting signals. *Philips Tech. Rev.*, 32:73–78, 1971.
- [107] M. E. Wise. The geometric of lognormal and related distributions and an application to tracer-dilution curves. *Statistica Neerlandica*, 20(1):119–142, 1966.
- [108] T. K. Worthington, T. J. Chainer, J.D. Williford, et S. C. Gundersen. IBM dynamic signature verification. Dans J. B. Grimson et H. J. Kugler, éditeurs, *Computer Security, IFIP 1985*, pages 129–154. Elsevier Science Publishers B. V. (North-Holland), 1985.
- [109] M. Yasuhara et M. Oka. Signature verification experiment based on nonlinear time alignment: a feasibility study. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 7:212–216, mars 1977.

Annexe A

LOGNORMALE BORNÉE

Il est facile de montrer, à partir de la démonstration de R. Plamondon dans l'article [72] conduisant à l'équation d'une lognormale, qu'en modifiant la relation liant les temps de réponses cumulés T_j , on peut obtenir un modèle lognormal borné (la courbe lognormale étant un cas particulier de la courbe lognormale bornée).

Dans la démonstration de R. Plamondon [72], on a la relation suivante:

$$T_j - T_{j-1} = \epsilon_j \Phi(T_{j-1}) \quad (\text{A.1})$$

Avec:

$$\Phi(X) = X \quad (\text{A.2})$$

Maintenant, si la fonction $\Phi(X) = X(b - aX)$, alors on obtient les relations suivantes:

$$T_j - T_{j-1} = \epsilon_j T_{j-1} (b - aT_{j-1}) \quad (\text{A.3})$$

$$T_j = T_{j-1} + \epsilon_j b T_{j-1} - \epsilon_j a T_{j-1}^2 \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{T_j - T_{j-1}}{(b - aT_{j-1}) T_{j-1}} = \epsilon_j \quad (\text{A.5})$$

Remarque: Si $a = 0$ et $b = 1$ alors on se retrouve dans le cas cité par R. Plamondon.

$$T_j - T_{j-1} = (1 + \epsilon_j)T_{j-1} \quad (\text{A.6})$$

À partir de la relation A.5 on peut écrire:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \frac{T_j - T_{j-1}}{(b - aT_{j-1})T_{j-1}} &\approx \int_{T_0}^{T_n} \frac{dT}{(b - aT)T} \\ &\approx \frac{1}{b} \left[\ln \left(\frac{T_n}{b - aT_n} \right) - \ln \left(\frac{T_0}{b - aT_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Par conséquent:

$$\frac{1}{b} \left[\ln \left(\frac{T_n}{b - aT_n} \right) - \ln \left(\frac{T_0}{b - aT_0} \right) \right] \approx \epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots + \epsilon_n \quad (\text{A.8})$$

Selon les mêmes conditions que celles citées par R. Plamondon, dans ce cas $H(t)$ tend asymptotiquement vers une courbe lognormale bornée.

$$H(t) = \frac{Db}{\sigma\sqrt{2\pi} t(b - at)} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln \left(\frac{t}{b - at} \right) - \mu \right]^2 \right] \quad (\text{A.9})$$

Annexe B

CALCUL VECTORIEL DES VITESSES

B.1 Mouvement simple

Dans le cas d'un mouvement simple résultant de l'action neuromusculaire agonistes et antagonistes (ex: trait de crayon) la vitesse peut se résumer à l'équation (B.1) où les indices 1 et 2 sont utilisés respectivement pour décrire l'action des systèmes neuromusculaires agoniste et antagoniste.

$$\vec{v}_\sigma(t) = \vec{v}_{\sigma_1}(t) + \vec{v}_{\sigma_2}(t) \quad (\text{B.1})$$

Pour calculer le module de la vitesse on peut utiliser le carré scalaire:

$$\vec{v}_\sigma(t)^2 = \|\vec{v}_\sigma(t)\|^2 \quad (\text{B.2})$$

ainsi:

$$\begin{aligned} \|\vec{v}_\sigma(t)\|^2 &= [\vec{v}_{\sigma_1}(t) + \vec{v}_{\sigma_2}(t)]^2 \\ &= \|\vec{v}_{\sigma_1}(t)\|^2 + \|\vec{v}_{\sigma_2}(t)\|^2 + 2\|\vec{v}_{\sigma_1}(t)\| \cdot \|\vec{v}_{\sigma_2}(t)\| \cos(\widehat{\vec{v}_{\sigma_1}(t), \vec{v}_{\sigma_2}(t)}) \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

puisque la vitesse d'une synergie résulte de l'action opposée de 2 systèmes neuromusculaires alors:

$$\cos(\vec{v}_{\sigma_1}(t), \vec{v}_{\sigma_2}(t)) = -1 \quad (\text{B.4})$$

ce qui nous donne:

$$\|\vec{v}_{\sigma}(t)\|^2 = \|\vec{v}_{\sigma_1}(t)\|^2 + \|\vec{v}_{\sigma_2}(t)\|^2 - 2\|\vec{v}_{\sigma_1}(t)\| \cdot \|\vec{v}_{\sigma_2}(t)\| \quad (\text{B.5})$$

$$= [\|\vec{v}_{\sigma_1}(t)\| - \|\vec{v}_{\sigma_2}(t)\|]^2 \quad (\text{B.6})$$

pour simplifier l'écriture on se donne comme convention que:

$$\|\vec{v}_{\sigma}(t)\| = v_{\sigma}(t) \quad (\text{B.7})$$

Avec cette nouvelle convention, l'équation (B.6) peut s'écrire:

$$v_{\sigma}(t)^2 = [v_{\sigma_1}(t) - v_{\sigma_2}(t)]^2 \quad (\text{B.8})$$

Par conséquent:

$$v_{\sigma}(t) = |v_{\sigma_1}(t) - v_{\sigma_2}(t)| \quad (\text{B.9})$$

Avec:

$$v_{\sigma_1}(t) = \frac{D_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi} (t - t_0)} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_1^2} [\ln(t - t_0) - \mu_1]^2 \right] \quad (\text{B.10})$$

$$v_{\sigma_2}(t) = \frac{D_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi} (t - t_0)} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_2^2} [\ln(t - t_0) - \mu_2]^2 \right] \quad (\text{B.11})$$

D'après les calculs précédents, on constate que le fait de connaître le module de la vitesse curvilinéaire v_{σ} au cours du temps nous permet de retrouver les paramètres du modèle (avec l'aide de méthodes de régression non linéaire) et ceci dans le cas de traits qui résultent d'une synergie simple. Par contre, dans le cas d'un mouvement composés, où la vitesse résultante dépend d'une sommation de couples agonistes et

antagonistes, le calcul des paramètres se révèle plus complexe.

Remarque: Pour ne pas alourdir les calculs suivants nous allons retirer l'indice σ aux différentes vitesses.

B.2 Mouvement composé

Dans le cas d'un tracé composé, par analogie avec l'équation (B.1), on peut écrire la vitesse sous la forme de l'équation (B.12).

$$\vec{v}(t) = \sum_{k=1}^p \vec{v}_k(t) \quad (\text{B.12})$$

où p est un multiple de 2 pour tenir compte de la présence des agonistes et des antagonistes.

Comme pour la vitesse d'un trait simple, nous allons calculer le module en prenant le carré scalaire.

$$\vec{v}(t)^2 = \|\vec{v}(t)\|^2 = \left[\sum_{k=1}^p \vec{v}_k(t) \right]^2 \quad (\text{B.13})$$

En développant le carré scalaire de la somme des vecteurs, nous obtenons:

$$\|\vec{v}(t)\|^2 = \sum \frac{2!}{n_1! n_2! \dots n_p!} \vec{v}_1(t)^{n_1} \vec{v}_2(t)^{n_2} \dots \vec{v}_p(t)^{n_p} \quad (\text{B.14})$$

où la somme, notée \sum est prise pour tous les entiers n_1, n_2, \dots, n_p pour lesquels $n_1 + n_2 + \dots + n_p = 2$.

Compte tenu du tableau (B.1), l'équation (B.14) peut se simplifier et se réécrire de la façon suivante:

$$\|\vec{v}(t)\|^2 = \sum_{i=1}^p \left[\sum_{j=i}^p k v_i(t) v_j(t) \cos(\widehat{\vec{v}_i(t); \vec{v}_j(t)}) \right] \quad (\text{B.15})$$

n_1	n_2	n_3	\dots	n_{p-3}	n_{p-2}	n_{p-1}	n_p
2	0	0	\dots	0	0	0	0
1	1	0	\dots	0	0	0	0
1	0	1	\dots	0	0	0	0
\vdots							\vdots
\vdots							\vdots
0	2	0	\dots	0	0	0	0
0	1	1	\dots	0	0	0	0
0	1	0	\dots	0	0	0	0
0	1	0	\dots	0	0	0	0
\vdots							\vdots
\vdots							\vdots
0	0	0	\dots	0	1	1	0
0	0	0	\dots	0	0	1	1
0	0	0	\dots	0	0	0	2

Tableau B.1: Somme des indices

avec:

$$k = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 2 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (\text{B.16})$$

et:

$$v_i(t) = \frac{D_i}{\sigma_i \sqrt{2\pi} (t - t_0)} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_i^2} [\ln(t - t_0) - \mu_i]^2 \right] \quad (\text{B.17})$$

$$v_j(t) = \frac{D_j}{\sigma_j \sqrt{2\pi} (t - t_0)} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_j^2} [\ln(t - t_0) - \mu_j]^2 \right] \quad (\text{B.18})$$

Donc, si on veut calculer correctement les paramètres en tenant compte du fait que les vitesses sont signées (cf: le modèle de R. Plamondon [72]) il faut tenir compte des termes en cosinus. En considérant une sommation linéaire des profils de vitesse, on néglige ces termes comme si le module d'une somme était égal à la somme des modules. Donc l'extraction des paramètres est erronée, sauf pour des traits simples, car dans ce cas les termes $\cos(\widehat{\vec{v}_i}; \vec{v}_j)$ sont égaux à -1 . Pour calculer les vrais paramètres du

modèle il faut un moyen de connaître les valeurs des termes en $\cos(\widehat{\vec{v}_i; \vec{v}_j})$.

Dans le cas d'une ligne brisée, le problème peut se simplifier et les $\cos(\widehat{\vec{v}_i; \vec{v}_j})$ peuvent être mesurés à partir des tracés manuscrits originaux. La vitesse ne changeant de direction de façon discontinue, les angles entre les différentes vitesses $\widehat{\vec{v}_i; \vec{v}_j}$ restent constants ce qui permet de les mesurer une fois pour toute.

Par contre, dans le cas de signatures ou d'écritures avec la présence de courbures non nulles, les directions des vecteurs vitesses changent constamment. Une façon de résoudre cet épineux problème est présenté dans cette thèse.

Annexe C

CALCUL DE LA VITESSE LE LONG D'UN TRAIT

Si P est un point se déplaçant le long de la trajectoire d'un trait courbe (voir figure C.1 et que le point C désigne le centre du cercle alors on peut écrire:

$$\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OC} + \overrightarrow{CP} \quad (\text{C.1})$$

$$\overrightarrow{OP} = x_c \vec{i} + y_c \vec{j} + \rho \cos \varphi \vec{i} + \rho \sin \varphi \vec{j} \quad (\text{C.2})$$

$$\overrightarrow{OP} = (x_c + \rho \cos \varphi) \vec{i} + (y_c + \rho \sin \varphi) \vec{j} \quad (\text{C.3})$$

$$\overrightarrow{OP} = X(t) \vec{i} + Y(t) \vec{j} \quad (\text{C.4})$$

Si on prend la dérivée de \overrightarrow{OP} par rapport au temps, on obtient:

$$\frac{d\overrightarrow{OP}}{dt} = \frac{dX(t)}{dt} \vec{i} + \frac{dY(t)}{dt} \vec{j} \quad (\text{C.5})$$

pour la dérivée de $X(t)$ on a:

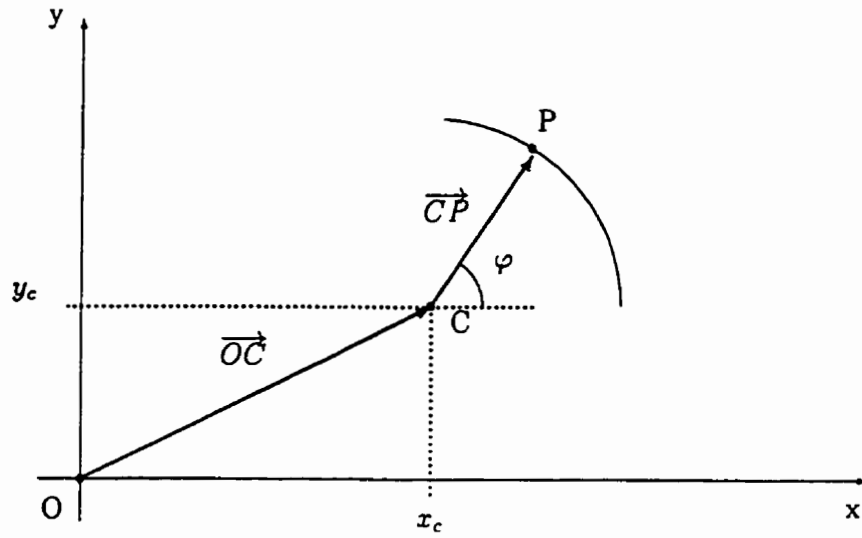


Figure C.1: Calcul de la vitesse le long d'un trait

$$\frac{dX(t)}{dt} = \frac{dx_c}{dt} + \frac{d\rho \cos \varphi}{dt} \quad (\text{C.6})$$

$$= -\rho \dot{\varphi} \sin \varphi \quad (\text{C.7})$$

et pour la dérivée de $Y(t)$:

$$\frac{dY(t)}{dt} = \frac{dy_c}{dt} + \frac{d\rho \sin \varphi}{dt} \quad (\text{C.8})$$

$$= \rho \dot{\varphi} \cos \varphi \quad (\text{C.9})$$

donc on obtient:

$$\frac{d\vec{OP}}{dt} = -\rho \dot{\varphi} \sin \varphi \vec{i} + \rho \dot{\varphi} \cos \varphi \vec{j} \quad (\text{C.10})$$

Pour connaître le module de la vitesse de la pointe de la plume, il suffit de prendre

la norme de la dérivée du vecteur \overrightarrow{OP} , ce qui nous donne:

$$\|\vec{v}\| = \sqrt{\rho^2 \dot{\varphi}^2 \sin^2 \varphi + \rho^2 \dot{\varphi}^2 \cos^2 \varphi} \quad (\text{C.11})$$

$$= \sqrt{\rho^2 \dot{\varphi}^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)} \quad (\text{C.12})$$

$$= |\rho \dot{\varphi}| \quad (\text{C.13})$$

Annexe D

SIGNATURES

(voir page suivante)

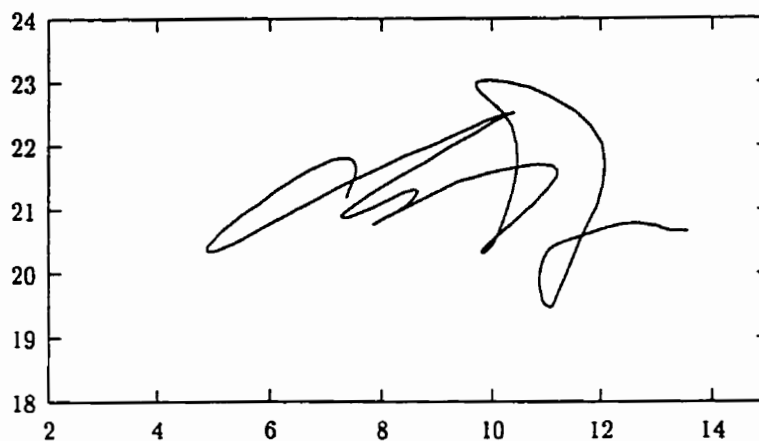


Figure D.1: Signature originale du signataire 11

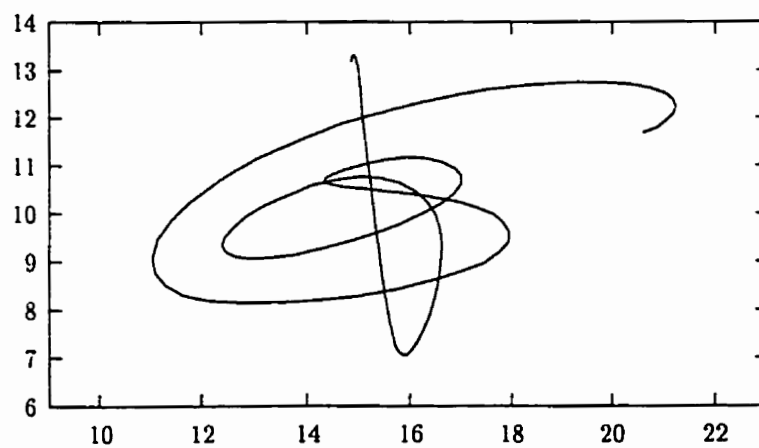


Figure D.2: Signature originale du signataire 16

Annexe E

ERREURS QUADRATIQUES

MOYENNES

E.1 Image de la signature

voir tableaux pages 208 et 209.

E.2 Vitesse curviligne

voir tableaux pages 210 et 211.

E.3 Vitesse angulaire

voir tableaux pages 212 et 213.

Tableau E.1: *EQM* de la tablette WACOM pour la banque de signatures

<i>indiv.</i>	<i>EQM (en cm²)</i>				
01	0.0218	0.0338	0.0180	0.0190	0.0438
02	0.0034	0.0042	0.0020	0.0039	0.0084
03	0.0240	0.0204	0.0129	0.0143	0.0306
04	0.0090	0.0079	0.0250	0.0062	0.0089
05	0.0088	0.0160	0.0089	0.0157	0.0127
06	0.0513	0.0037	0.0063	0.0101	0.0040
07	0.0046	0.0030	0.0053	0.0047	0.0037
08	0.0780	0.0176	0.0050	0.0150	0.0184
09	0.0107	0.0116	0.0240	0.1569	0.0745
10	0.0410	0.0504	0.0219	0.1841	0.0654
11	0.1636	0.0989	0.1587	0.2195	0.2607
12	0.0047	0.4366	0.0035	0.0060	0.0066
13	0.0432	0.0338	0.0402	0.0809	0.0380
14	0.4195	0.3155	0.4062	0.3024	0.5116
15	0.0488	0.0079	0.0180	0.0142	0.0092
16	0.3036	0.1879	0.1738	0.0811	0.4048
17	0.1745	0.0598	0.3053	0.1343	0.0236
18	0.2080	0.0658	0.3422	0.0512	0.2046
19	0.1313	0.0261	0.1301	0.0245	0.0347
20	0.0858	0.0560	0.0465	0.0702	0.0567
21	0.4614	0.0579	0.0878	0.0645	0.5895
22	0.0839	0.0764	0.0493	0.1464	0.0921

Tableau E.2: *EQM* de la tablette PENCEPT pour la banque de signatures

<i>indiv.</i>	<i>EQM (en cm²)</i>				
01	0.0240	0.0230	0.0261	0.0094	0.0185
02	0.0017	0.0066	0.0036	0.0085	0.0050
03	0.0178	0.0184	0.0207	0.0182	0.0088
04	0.0182	0.0170	0.0112	0.0146	0.2782
05	0.0115	0.0171	0.0053	0.0088	0.0104
06	0.0057	0.0074	0.0070	0.0155	0.0065
07	0.0194	0.0046	0.0035	0.0065	0.0052
08	0.0077	0.0094	0.0053	0.0137	0.0048
09	0.0529	0.0718	0.1050	0.0494	0.0343
10	0.0131	0.0432	0.0323	0.9682	0.0719
11	0.0873	0.1211	0.1752	0.0839	0.1437
12	0.0046	0.0086	0.0187	0.0083	0.0039
13	0.0136	0.0309	0.0495	0.0314	0.0486
14	0.3189	0.3186	0.1379	0.2968	0.0686
15	0.0482	0.0267	0.0239	0.0256	0.0180
16	0.1672	0.0419	0.2251	0.1463	0.7234
17	0.1170	0.0161	0.0491	0.0362	0.0282
18	0.1211	0.2054	0.1238	0.1597	0.0177
19	0.1356	0.1181	0.5219	0.0713	0.2555
20	0.0551	0.0528	0.0662	0.0309	0.0391
21	0.1254	0.3809	0.0846	0.1290	0.2746
22	0.0775	0.0786	0.2115	0.4354	0.0898

Tableau E.3: *EQM* de la tablette WACOM pour la vitesse curviligne

<i>indiv.</i>	<i>EQM vitesse curviligne (en cm²/s²)</i>				
01	12.08	17.85	12.54	9.27	18.66
02	0.64	0.66	0.62	1.39	1.16
03	10.56	10.35	7.21	8.59	8.16
04	5.04	5.85	12.22	5.04	4.99
05	6.73	6.92	4.47	8.08	7.11
06	39.51	1.72	3.25	4.78	2.59
07	1.07	0.61	1.17	0.97	0.97
08	7.94	3.12	3.34	1.07	2.40
09	9.00	3.51	15.71	31.87	25.87
10	20.66	17.66	8.91	91.98	51.11
11	74.92	59.08	63.36	64.94	65.62
12	2.32	96.51	0.68	1.90	2.66
13	6.13	17.03	4.68	2.95	4.21
14	130.51	123.51	210.31	97.47	65.99
15	23.27	3.57	7.19	7.49	5.07
16	62.47	56.74	15.46	15.54	49.07
17	11.91	9.88	15.46	37.51	9.82
18	47.83	21.36	35.63	10.30	24.29
19	20.63	7.91	61.14	11.69	8.97
20	29.17	18.13	19.93	27.98	15.27
21	94.49	17.90	29.24	29.69	151.43
22	27.80	30.80	19.47	47.78	30.07

Tableau E.4: *EQM* de la tablette PENCEPT pour la vitesse curviligne

<i>indiv.</i>	<i>EQM vitesse curviligne (en cm²/s²)</i>				
01	12.01	13.51	12.10	9.45	11.06
02	0.72	4.07	1.38	1.25	1.04
03	8.22	6.99	7.18	5.04	4.88
04	4.74	7.18	5.48	9.50	40.04
05	8.73	8.25	3.89	5.01	5.24
06	2.75	3.89	4.55	5.53	2.73
07	1.85	1.62	1.52	1.31	1.46
08	2.12	1.65	0.71	2.13	1.92
09	15.50	17.93	17.81	15.89	24.59
10	3.88	11.93	5.88	74.10	15.15
11	36.20	44.78	57.78	27.23	61.98
12	2.26	2.24	4.99	2.24	2.14
13	3.55	8.42	4.65	2.74	5.16
14	68.85	87.54	61.64	130.84	22.21
15	19.55	17.26	13.80	12.81	17.36
16	18.55	6.99	48.17	24.93	71.69
17	13.61	6.69	22.61	13.71	15.92
18	26.22	32.19	15.23	24.09	12.71
19	16.74	34.86	59.87	21.64	37.77
20	13.40	14.96	26.50	18.15	21.17
21	34.94	80.08	23.58	20.53	21.47
22	26.47	28.91	29.76	33.05	22.58

Tableau E.5: *EQM* de la tablette WACOM pour la vitesse angulaire

<i>indiv.</i>	<i>EQM vitesse angulaire (en rad²/s²)</i>				
01	30843.38	37501.04	27635.90	15290.36	5215.56
02	8129.21	7753.46	4859.26	16810.52	13526.41
03	10602.36	5592.84	7383.73	9900.09	8939.57
04	232596.63	6198.20	7186.61	10876.20	24950.48
05	21872.79	6286.06	56292.62	26956.80	12220.91
06	6054.69	9419.19	10477.24	25371.92	6172.47
07	33569.36	6806.46	10223.83	32533.92	2241.17
08	28065.36	23743.17	2810.68	26236.71	16652.19
09	55783.27	43298.04	7197.95	13591.61	243331.31
10	55186.29	12464.05	183188.27	19507.43	17606.32
11	55892.13	5188.65	3953.39	6186.01	4508.06
12	3306.06	30232.24	5556.40	16208.67	11384.91
13	2523.30	11974.18	3970.55	3838.01	3956.49
14	27696.81	7276.08	17059.90	18699.58	6033.51
15	21566.03	3143.70	9917.50	7956.34	2504.42
16	1787.33	724.51	710.54	112.01	919.71
17	13853.84	3824.62	75194.95	3288.84	7991.94
18	1776.01	5833.98	11013.68	1034.85	16481.72
19	7386.96	11639.25	28377.32	6151.88	9201.84
20	6003.85	4728.47	15502.42	23037.26	8388.99
21	19362.56	40811.20	4470.46	2663.50	2773.63
22	7638.50	10760.10	12118.75	5874.25	3122.53

Tableau E.6: *EQM* de la tablette PENCEPT pour la vitesse angulaire

<i>indiv.</i>	<i>EQM vitesse angulaire (en rad²/s²)</i>				
01	5299.53	19342.09	18090.93	7772.15	12250.04
02	5138.80	8323.45	4492.02	12983.23	15101.83
03	7738.98	6582.02	11233.69	8086.77	25864.04
04	12719.39	13156.15	6829.61	6426.63	35413.92
05	10521.08	35455.92	617770.85	9602.30	16933.00
06	12165.68	17100.52	14093.76	840242.84	5663.04
07	12347.79	4799.83	3168.34	2203.85	25362.10
08	18079.99	16542.90	3827.59	8712.85	13744.44
09	24042.67	32212.47	7141.21	38995.50	14026.57
10	6315.96	7457.42	8989.52	9387.28	4372.39
11	29593.08	20235.70	2866.68	1803.97	65367.32
12	40175.68	8375.14	23521.89	9591.29	9236.03
13	13169.59	4285.14	8136.31	5421.22	5990.51
14	4370.70	17187.92	8520.92	2844.02	2003.80
15	4944.10	7183.34	19838.81	151565.24	170222.96
16	2495.33	218.61	1063.69	654.13	1183.99
17	7711.30	3188.09	42842.28	4882.59	9042.41
18	14849.06	2252.04	17251.74	3054.47	14062.14
19	4051.93	3159.39	33675.78	9329.60	29453.47
20	13002.72	5860.30	8771.69	9787.38	1938.59
21	2536.51	2399.11	2289.18	893055.73	5503.60
22	20230.67	6505.27	2507.59	6441.70	2322.06

Annexe F

COMPARAISON DE SIGNATURES

Dans les pages qui suivent on retrouve les quatre exemples de signatures donnés pour représenter les quatre grands types de signature soit:

1. nord-américaine ;
2. arabe ;
3. chinoise ;
4. européenne.

Les signatures sont présentées dans le même ordre que l'énumération. Ces signatures sont comparées à celles obtenues par la représentation. Sur ces différentes figures, "*ori*" sera utilisé pour identifier la signature originale et "*syn*" le synthétique correspondant. Ensuite dans cette même annexe on retrouvera les profils de vitesse curviligne et angulaire originaux comparés aux signaux synthétiques.

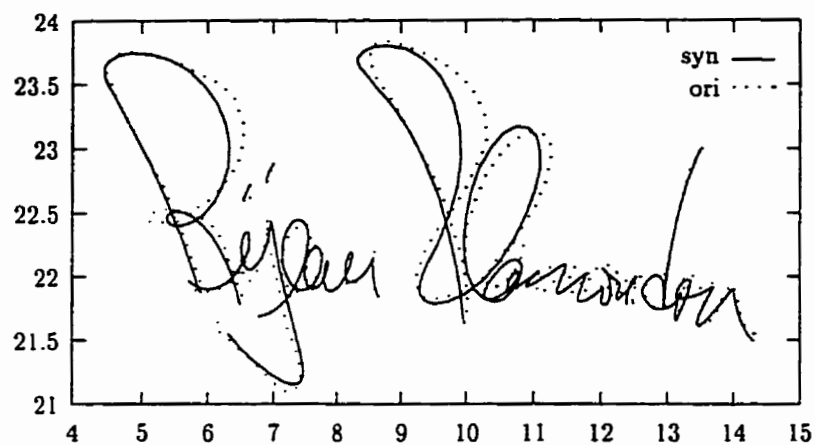


Figure F.1: signataire de type nord-américain: image de la signature

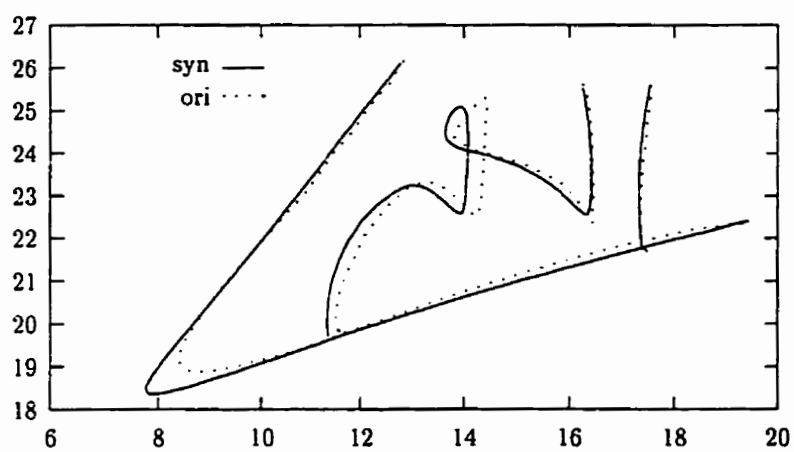


Figure F.2: signataire de type arabe: image de la signature

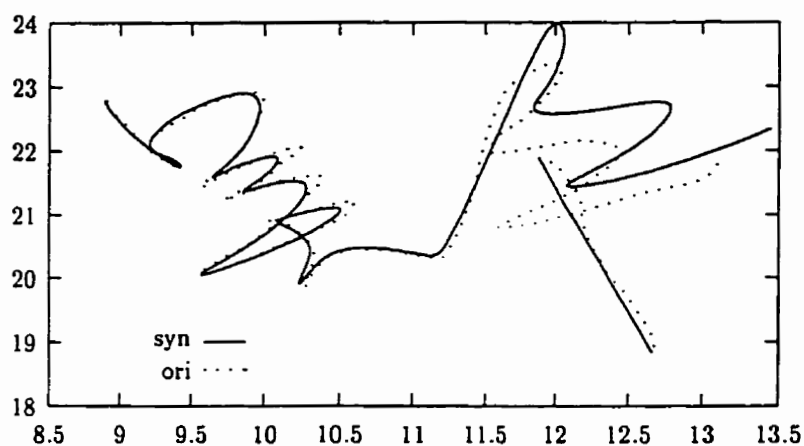


Figure F.3: signataire de type chinois: image de la signature

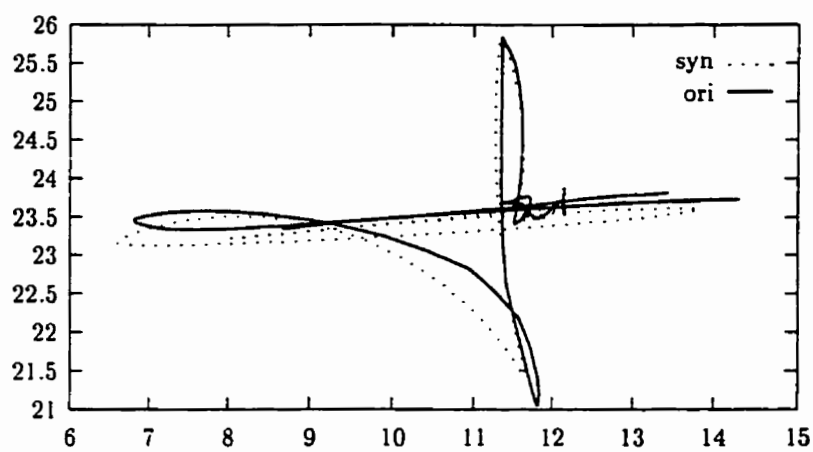


Figure F.4: signataire de type européen: image de la signature

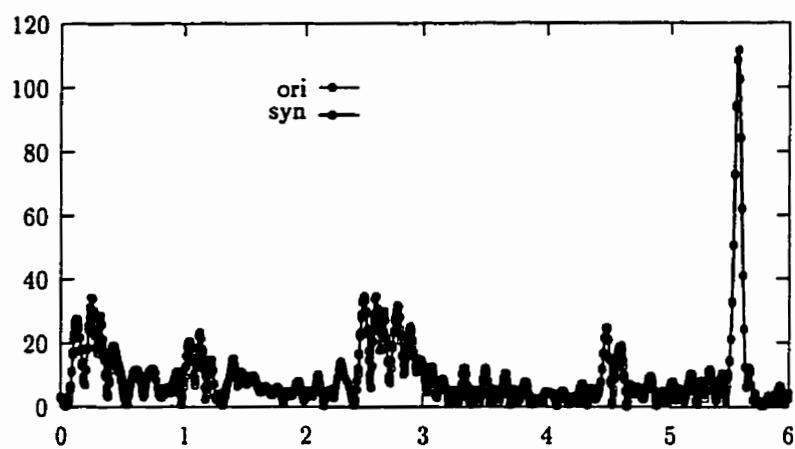


Figure F.5: signataire de type nord-américain: vitesse curviligne

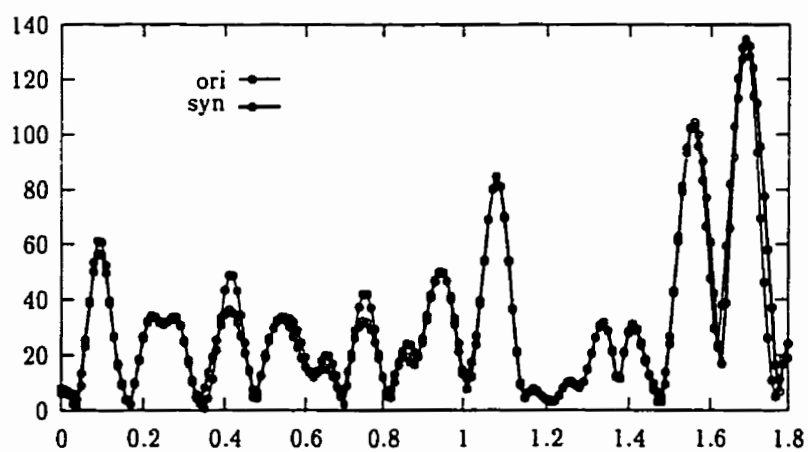


Figure F.6: signataire de type arabe: vitesse curviligne

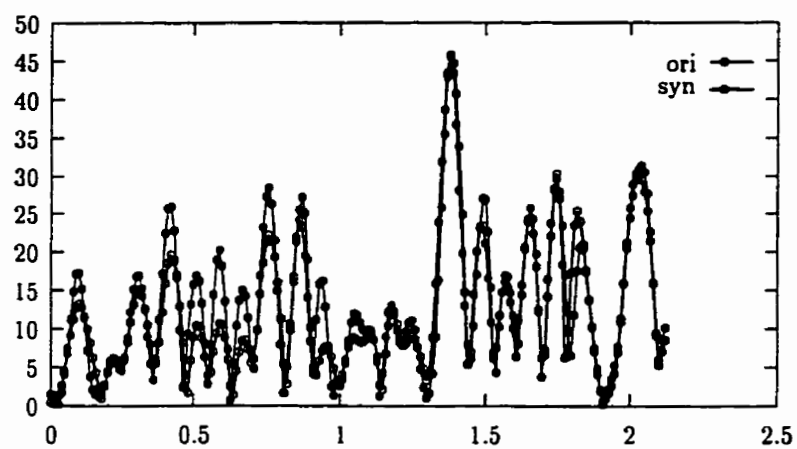


Figure F.7: signataire de type chinois: vitesse curviligne

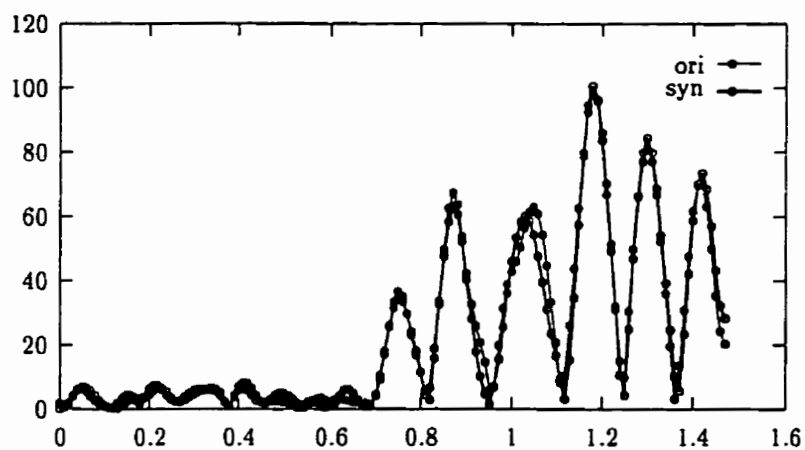


Figure F.8: signataire de type européen: vitesse curviligne

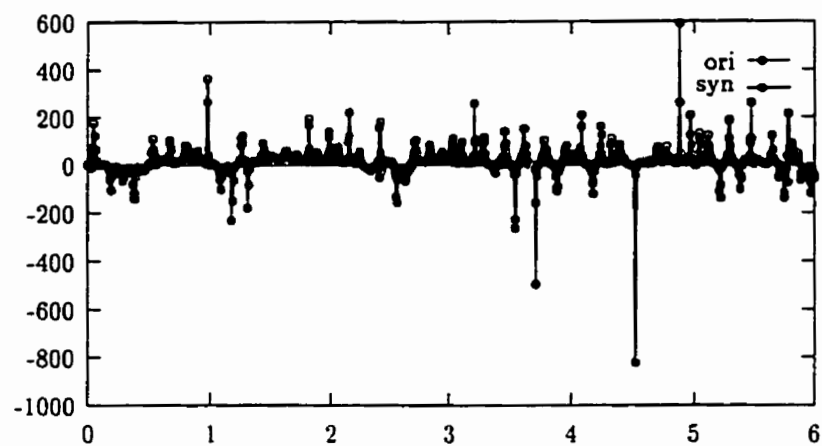


Figure F.9: signataire de type nord-américain: vitesse angulaire

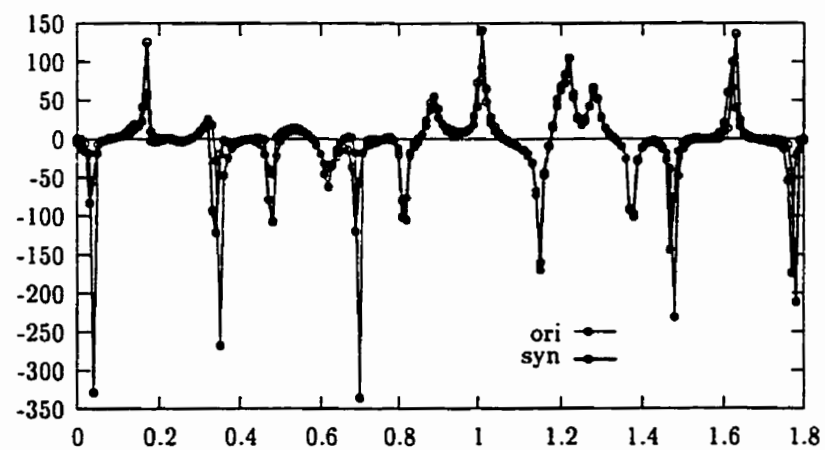


Figure F.10: signataire de type arabe: vitesse angulaire

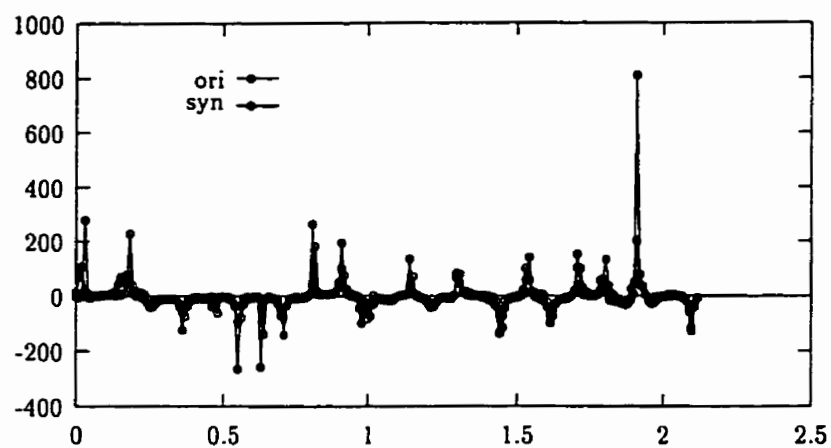


Figure F.11: signataire de type chinois: vitesse angulaire

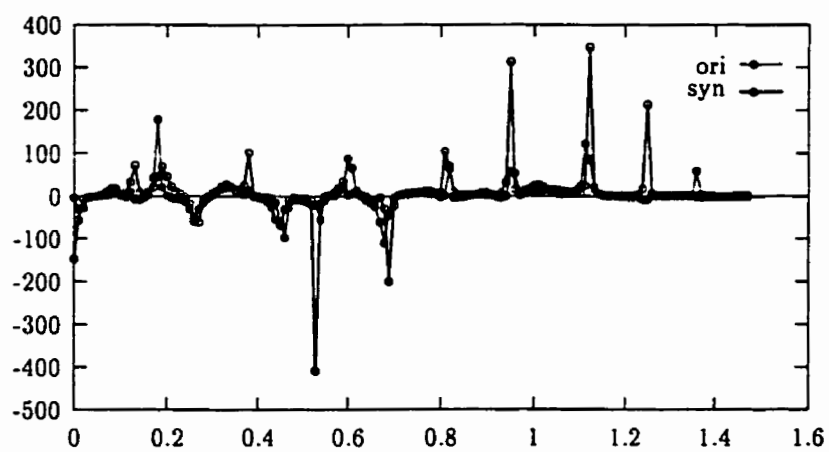


Figure F.12: signataire de type européen: vitesse angulaire

Annexe G

SIGNATURES ORIGINALES ET SYNTHÉTIQUES

Les figures qui suivent donnent 1 exemplaire pour chacun des signataires, soit 22 signatures au total. Dans ces différentes figures on trouve à gauche la signature originale et à droite la signature synthétique.

Les signatures synthétiques sont reconstruites après extraction automatique des paramètres avec la représentation proposée dans cette thèse.

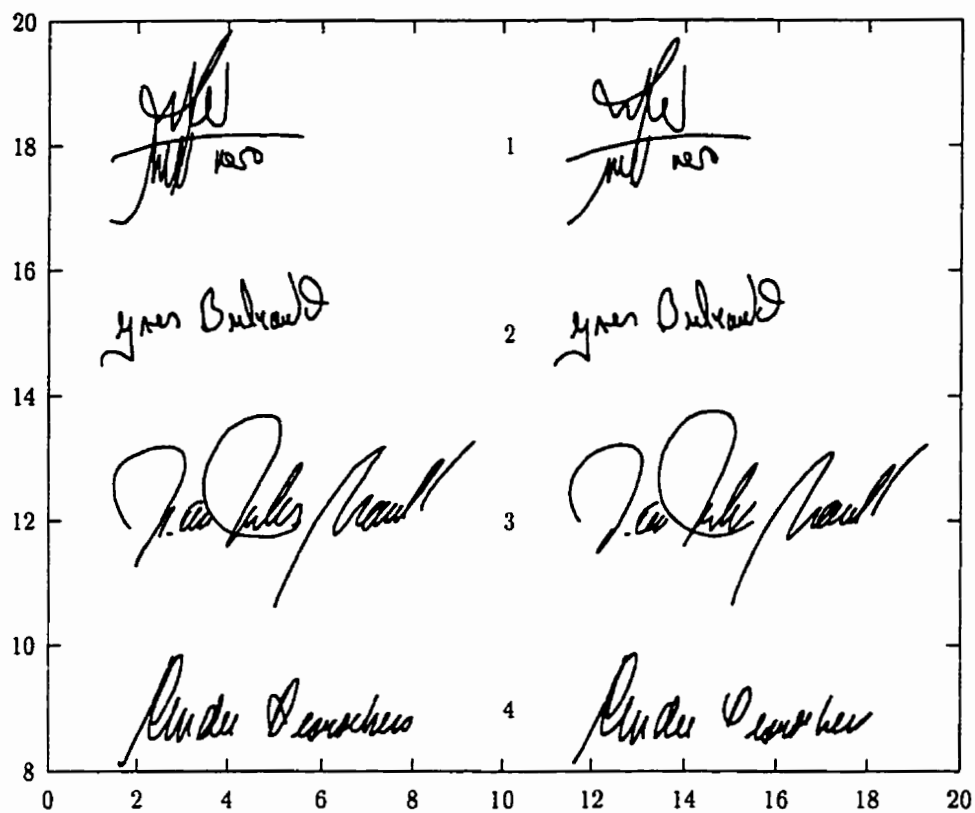


Figure G.1: Originaux et synthétiques des signataires 1 à 4

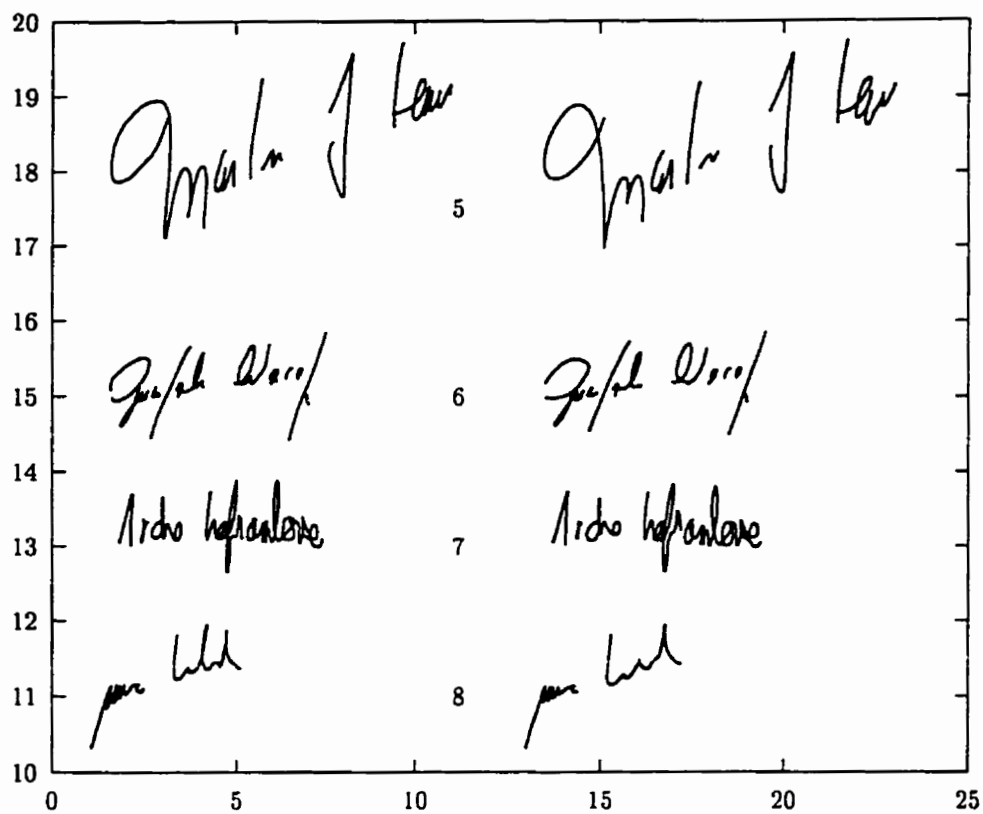


Figure G.2: Originaux et synthétiques des signataires 5 à 8

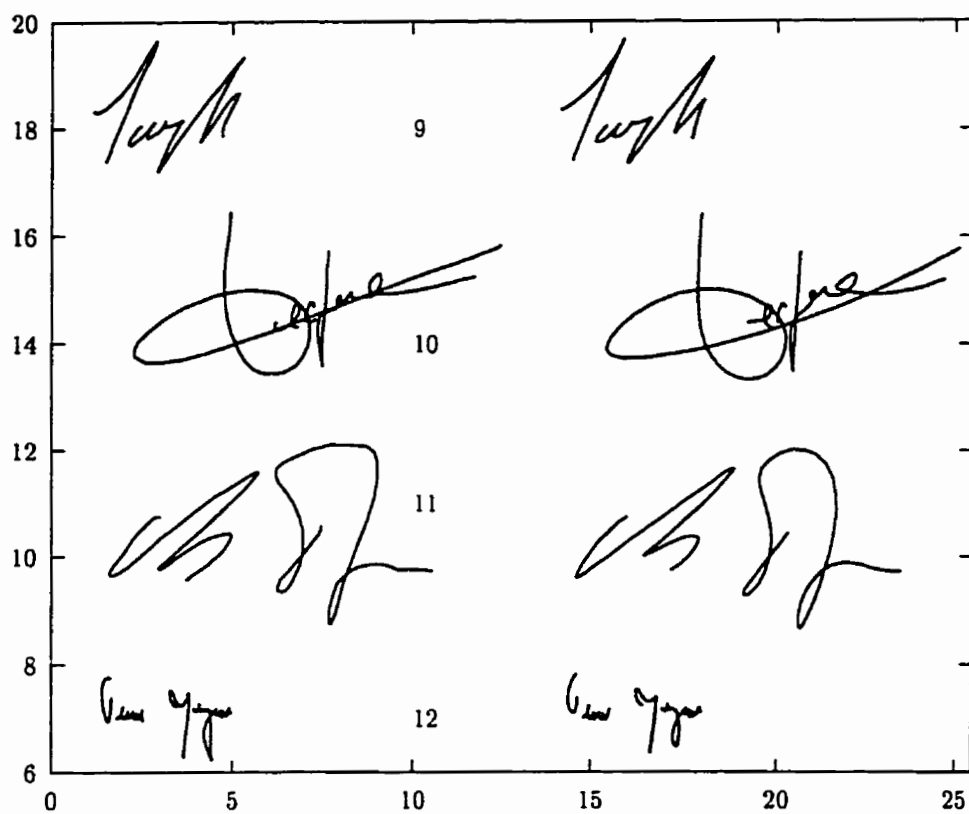


Figure G.3: Originaux et synthétiques des signataires 9 à 12

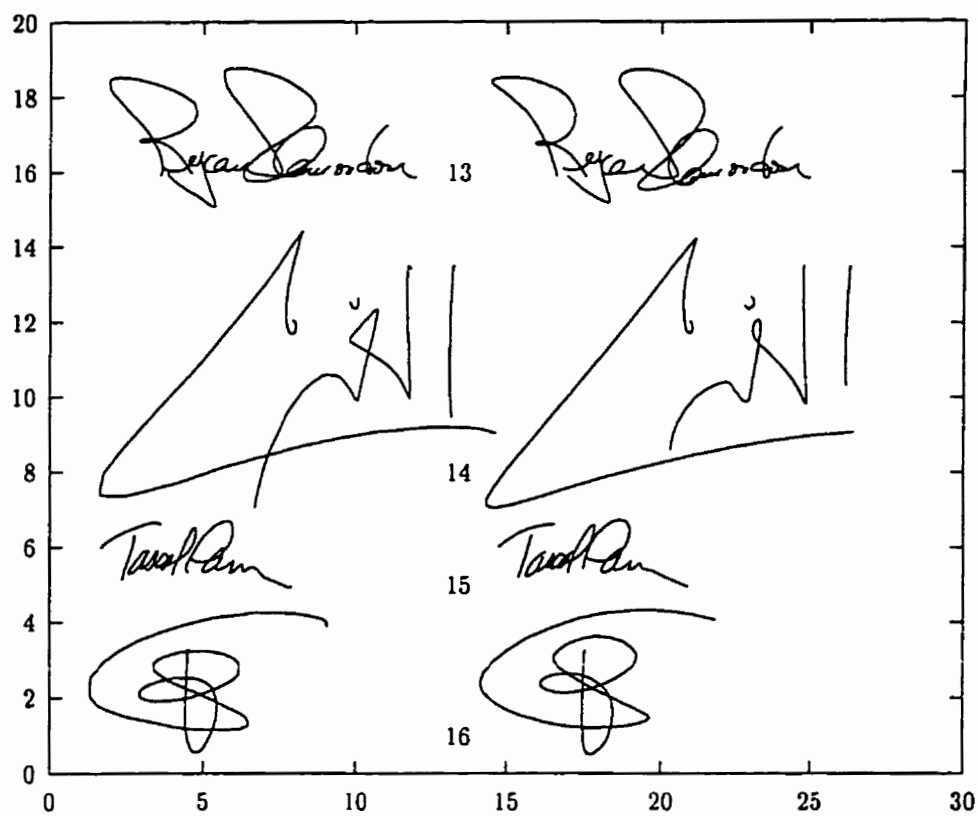


Figure G.4: Originaux et synthétiques des signataires 13 à 16

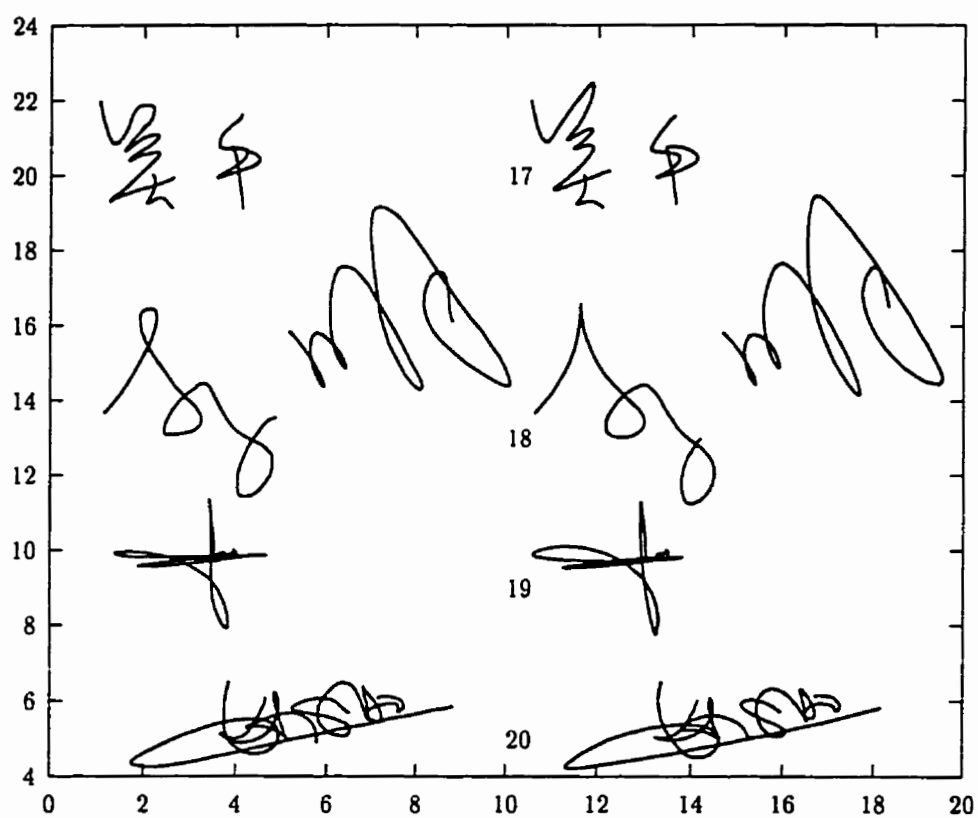


Figure G.5: Originaux et synthétiques des signataires 17 à 20

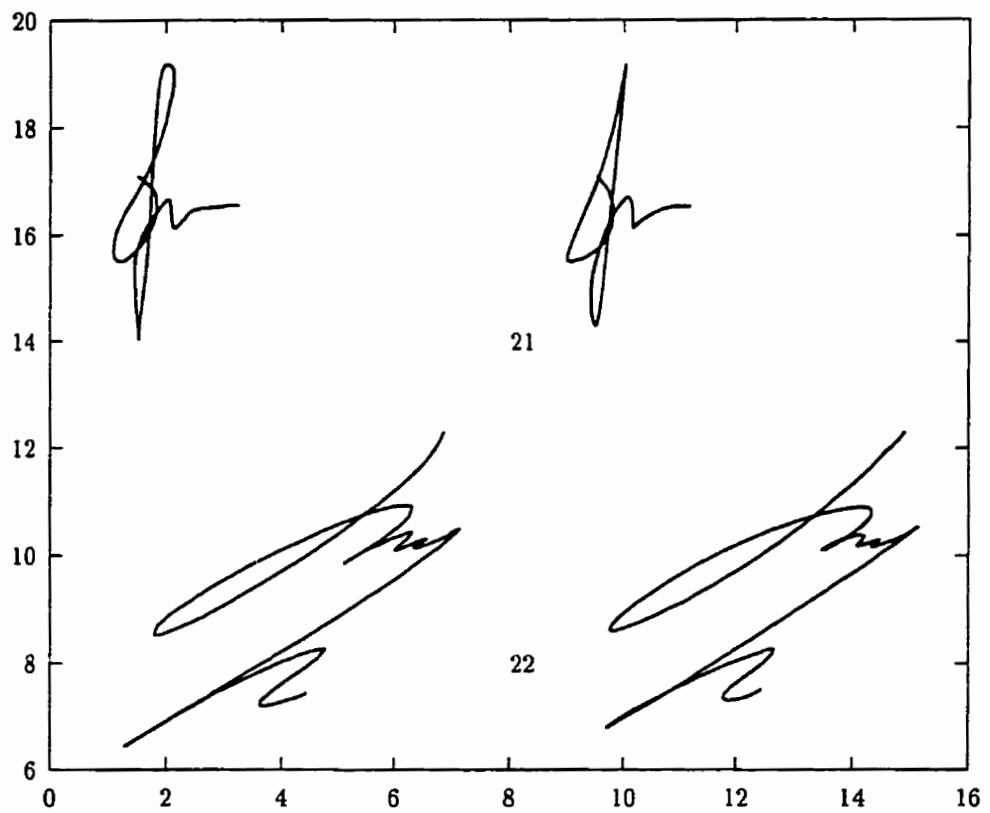


Figure G.6: Originaux et synthétiques des signataires 21 à 22

Annexe H

RÉSULTATS SUR LES FAUX ALÉATOIRES

(voir tableaux pages 229)

Voici pour mémoire la signification des paramètres *aa*, *rr*, *ii*, *ar*, ... utilisés dans les tableaux.

La lettre de gauche indique, pour chacun des couples, le résultat du système VDS sur un exemplaire original avec "a" pour *accepté*, "r" pour *refusé* et "i" pour *incertain*.

La lettre de droite quant à elle indique le résultat pour l'exemplaire synthétique correspondant à l'original avec la même signification pour les lettres.

Ainsi "aa" indique que VDS a accepté la signature originale et la synthétique correspondante, tandis que "ar" signifie qu'il a accepté la signature originale mais rejeté la synthétique correspondante

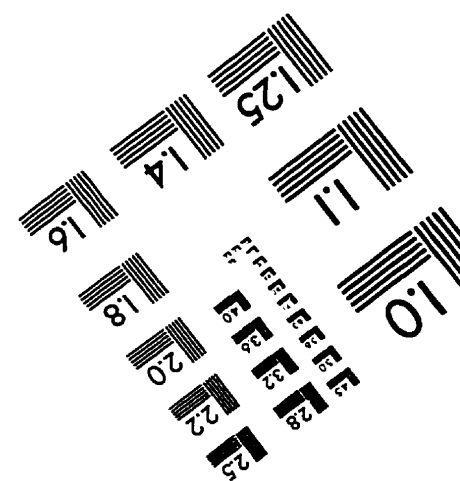
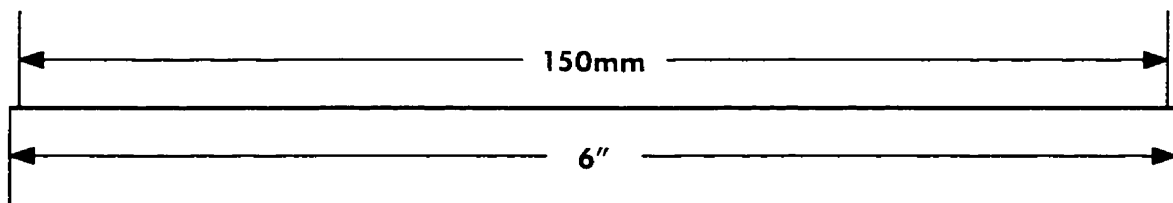
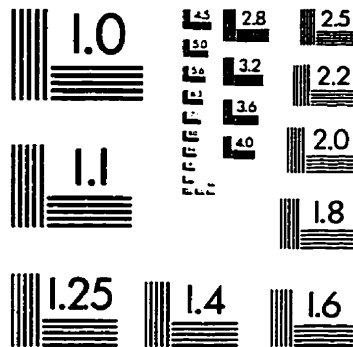
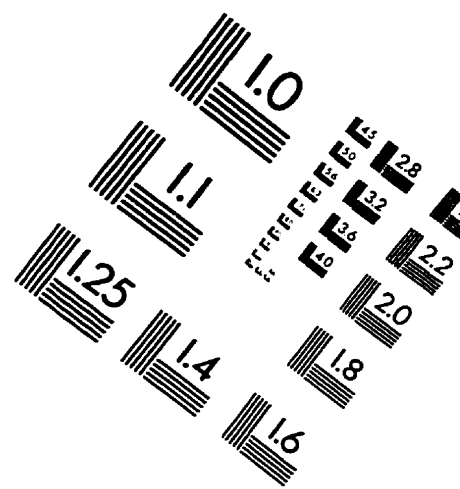
Tableau H.1: Résultats sur des faux aléatoires avec la tablette Wacom

Pondération	aa	rr	ii	ar	ra	ai	ia	ri	ir
par défaut	29	2236	1	17	18	0	1	6	2
paramétrique	58	2161	23	5	2	16	7	19	19
dynamique	240	1771	9	132	62	10	10	28	48
statique	691	1421	28	27	49	19	25	31	19

Tableau H.2: Résultats sur des faux aléatoires avec la tablette Pconcept

Pondération	aa	rr	ii	ar	ra	ai	ia	ri	ir
par défaut	18	2227	2	17	20	2	4	8	12
paramétrique	84	2128	28	10	7	20	8	7	18
dynamique	106	1888	18	92	66	15	13	41	71
statique	1013	1122	11	59	69	8	10	11	7

TEST TARGET (QA-3)



APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved